

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM SANEAMENTO,
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS

NATÁLIA DUARTE DA SILVA MOURA

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DA
PRECIPITAÇÃO NA RESPOSTA HIDROLÓGICA DE BACIAS URBANAS DE
PEQUENO PORTE**

Belo Horizonte

2020

Natália Duarte da Silva Moura

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DA
PRECIPITAÇÃO NA RESPOSTA HIDROLÓGICA DE BACIAS URBANAS DE
PEQUENO PORTE**

Versão final

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Modelagem de Processos Hidrológicos

Orientadora: Prof^a. Dr. Priscilla Macedo Moura
Coorientador: Prof. Dr. Wilson dos Santos Fernandes

Belo Horizonte

2020

Ficha catalográfica

M929e Moura, Natália Duarte da Silva.
Estudo da influência da distribuição espacial e temporal da precipitação na resposta hidrológica de bacias urbanas de pequeno porte [recurso eletrônico] / Natália Duarte da Silva Moura. – 2020.
1 recurso online (xi, 156 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Priscilla Macedo Moura.
Coorientador: Wilson dos Santos Fernandes.

Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais,
Escola de Engenharia.

Anexos: f. 108-156.

Bibliografia: f. 98-107.
Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Recursos hídricos - Desenvolvimento - Teses. 3. Precipitação (Meteorologia) - Teses. 4. Córrego Cachoeirinha (MG) - Teses. 5. Inundações - Teses. I. Moura, Priscilla Macedo. II. Fernandes, Wilson dos Santos. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.
CDU: 628(043)

Elaborado por Prof. Mário Werneck,
Biblioteca da Escola de Engenharia da UFMG



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos
Avenida Antônio Carlos, 6627 - 4º andar - 31270-901 - Belo Horizonte - BRASIL
Telefax: 55 (31) 3409-1882 - posgrad@desa.ufmg.br
<http://www.smarh.eng.ufmg.br>

FOLHA DE APROVAÇÃO

Estudo da Influência da Distribuição Espacial e Temporal da Precipitação Na
Resposta Hidrológica de Bacias Urbanas de Pequeno Porte

NATÁLIA DUARTE DA SILVA MOURA

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Profª PRISCILLA MACEDO MOURA

Prof. WILSON DOS SANTOS FERNANDES

Profª TALITA FERNANDA DAS GRAÇAS SILVA

Profª LUCIANA PEIXOTO AMARAL

Prof. FERNANDO NEVES LIMA

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Profª Taciána Toledo de Almeida Albuquerque
Subcoordenadora

Versão Final aprovada por

Profª Priscilla Macedo Moura
Orientadora

Belo Horizonte, 28 de fevereiro de 2020.

AGRADECIMENTOS

Ao condutor da minha vida, Deus! Por ter me encaminhado durante toda pesquisa, me dando força nos momentos mais difíceis e por ter colocado pessoas maravilhosas no meu caminho que me ajudaram a concluir esse trabalho e realizar mais esse sonho.

Aos meus pais e a minha tia Neide pelo apoio durante todo período do mestrado. Ao meu namorado Jônatas pela paciência, compreensão e companheirismo. A toda a minha família.

A minha orientadora Priscilla e coorientador Wilson pelo apoio, disponibilidade e pelos conselhos. A todos os professores do EHR que me ajudaram, especialmente ao Francisco, Éber, Letícia e Jamil. Aos funcionários do DESA e do EHR.

Gratidão eterna a minha amiga, Juni, que esteve sempre ao meu lado me ajudando durante todas as fases da pesquisa. Ao meu amigo Felipe, pela amizade e incentivo durante todo o trabalho. A todas as outras amigas, em especial a Ludmila que mesmo em outro país me ajudou na pesquisa e me motivou muito.

Ao André Araújo, André Rocha, Bárbara, Guilherme e Larissa, pelo coleguismo.

À Prefeitura Municipal de Belo Horizonte, que disponibilizou os dados.

À Rejane, que concedeu o modelo.

Ao CNPq, pela bolsa de estudo.

À banca examinadora, Talita Fernanda das Graças Silva, Luciana Peixoto Amaral e Fernando Neves Lima, que gentilmente aceitaram o convite para a avaliação dessa pesquisa.

RESUMO

Com a crescente ocupação urbana em locais suscetíveis a inundações, a gestão de água da chuva está cada vez mais complexa. Portanto, informações sobre as características das tempestades, contendo elevada resolução espacial e temporal são importantes para uma adequada modelagem chuva-vazão, que tem como um de seus objetivos proporcionar a melhoria das condições de previsões de inundações nas cidades. Diante dessa problemática, o presente trabalho objetivou avaliar se existe influência da variabilidade espacial e temporal da precipitação na resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica urbana de pequeno porte, por meio de duas abordagens, a primeira verificando a distribuição espaço-temporal dos eventos observados que geraram alertas na bacia e a segunda através de modelagem dos eventos com diferentes distribuições espaço temporais. Para essa pesquisa, foi escolhida a bacia do Córrego Cachoeirinha que se encontra no município de Belo Horizonte, MG, devido aos registros recorrentes de inundações no local. Para execução da metodologia, primeiramente foram selecionados os eventos que emitiram alerta de inundação na bacia. Foram utilizados os dados de precipitação das 42 estações de monitoramento de Belo Horizonte, com registro de precipitação a cada 10 minutos. Mapas de campos de chuva para os eventos foram criados para cada intervalo de 10 minutos, por meio da técnica geoestatística do Inverso da Distância à Potência (IDW), através da ferramenta Zonal Statistics as Table do ArcMap (versão 10.5). Por meio deste processo, foi possível obter o valor da precipitação média em cada sub-bacia para cada evento de chuva e intervalo de tempo, informações que foram usadas como dados de entrada no modelo. Para a modelagem foi utilizado o modelo hidrológico chuva-vazão, Storm Water Management Model (SWMM) definido na pesquisa de Siqueira, Moura e Silva (2019), com adaptações. O modelo, composto de 35 sub-bacias foi calibrado manualmente com os dados de nível d'água de alguns eventos observados. Após a calibração foi selecionado um novo grupo de eventos observados que foram simulados no modelo e gerados eventos sintéticos de mesma duração e total precipitado que os eventos observados escolhidos, rotacionando os campos de chuva dos eventos observados. Além disso, um terceiro objetivo foi também explorado, analisando-se se houve ganho na utilização da chuva de forma distribuída em relação à concentrada na modelagem. A partir das análises realizadas, foi possível concluir que existe influência da distribuição espacial e temporal da precipitação na resposta hidrológica da bacia do Cachoeirinha, e que o modelo utilizado representou bem essas influências. A

mudança no sentido da precipitação modifica principalmente o tempo ao pico do hidrograma. Conclui-se também que a maior parte dos eventos observados que geraram alertas têm sentido correspondente ao do curso d'água principal, vindo de montante para jusante na bacia. Ainda sobre o modelo, pôde-se concluir que as simulações tiveram melhor desempenho com a utilização da precipitação de forma distribuída do que concentrada, entretanto a melhor aderência dos resultados aos observados, avaliada por meio do coeficiente de Nash, não foi muito expressiva.

Palavras-chave: distribuição espaço-temporal da precipitação; flash floods; modelagem chuva-vazão.

ABSTRACT

With the increasing urban occupation in flood susceptible areas, storm water management is becoming more and more complex. Therefore, information about storm characteristics, in high spatial and temporal resolution, is important for an adequate rainfall-runoff modeling that can be used to improve the conditions of flood forecast in cities. In the light of this problem, the present study aimed at assessing whether the spatio-temporal variability of precipitation influences the hydrological response of a small urban watershed. Two approaches were used: the first was to verify the spatio-temporal distribution of the observed extreme events in the catchment and the second was to model events with different precipitation time and space distributions. For this research, I chose the Cachoeirinha catchment, located in Belo Horizonte, MG, due to its recurrent flood records. In order to undertake the methodology, I firstly selected the events that generated a flood alert in the catchment. To do so, precipitation data with 10-minutes temporal resolution from 42 monitoring stations in Belo Horizonte were used. Secondly, rainfall fields of the events were created for each 10-minutes interval, by applying the geostatistical technique of Inverse Distance Weighting (IDW) using the *Zonal Statistics as Table* from ArcMap (version 10.5). By doing that, it was possible to obtain the average rainfall in each sub-catchment for each rain event and time interval, which was then used as input in the model. Following, I adapted and used the rainfall-runoff model *Storm Water Management Model* (SWMM) for subsequent simulations as in Siqueira, Moura and Silva (2019). The model composed of 35 sub-catchments was manually calibrated with water level data from some observed events. After calibration, a new group of observed events was selected, which were simulated in the model and generated synthetic events of the same duration and total precipitate as the chosen observed events, rotating the rainfall fields of the observed events. In addition, a third objective was also explored, by analysing whether there was a gain in using spatially distributed rainfall in comparison to the lumped modeling approach. From the analysis outputs, it was possible to conclude that the hydrological response of the Cachoeirinha catchment is influenced by the spatial and temporal distribution of the precipitation and that the model correctly represented these influences. The changes in the spatio-temporal distribution of the precipitation mainly affect the time to the peak of the hydrograph. It was also concluded that most of the observed events with flood alert have the same direction of the main watercourse, coming from upstream to downstream in the catchment. Additionally,

it was possible to conclude that the simulations performed better with the use of the distributed approach than the lumped one. However the improvement, assessed using the Nash coefficient, was not very significant.

Keywords: spatio-temporal distribution of precipitation; flash floods; rain-runoff modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - A elevação normal do nível do rio, causa enchente e inundação	24
Figura 3.2 - Busca dos bombeiros por vítimas, no bairro Jardim Alvorada, na Região da Pampulha, em Belo Horizonte.....	25
Figura 3.3 - Cratera na avenida Tereza Cristina, em Belo Horizonte	25
Figura 3.4 - Etapas de modelagem hidrológica	38
Figura 3.5 - Esquema de representação do escoamento superficial no SWMM.....	40
Figura 4.1 - Fluxograma de representação das etapas metodológicas e indicação dos objetivos propostos.....	56
Figura 4.2 - Representação da bacia do Córrego Cachoeirinha	58
Figura 4.3 - Mapa de Belo Horizonte destacando a rede hidrográfica da bacia do Cachoeirinha	59
Figura 4.4 - Histórico de transbordamento do Córrego Cachoeirinha em 2011, 2012 e 2013.	60
Figura 4.5 - Inundação no Córrego Cachoeirinha em 2019	60
Figura 4.6 - Estação 13, localizada na Avenida Bernardo Vasconcelos, no Córrego Cachoeirinha	62
Figura 4.7 - Canal com a indicação dos níveis de alerta (Estação 13), na Avenida Bernardo de Vasconcelos.....	63
Figura 4.8 - Representação do modelo da bacia do Córrego Cachoeirinha montado no SWMM	66
Figura 4.9 - (A) Evento 05/03/18 20 min direção do evento real; (B) Evento 05/03/18 20 min - 360°; (C) Evento 05/03/18 20 min - 90°; (D) Evento 05/03/18 20 min - 180°; (E) Evento 05/03/18 20 min - 270°	77
Figura 4.10 - Etapas do procedimento de simulação da chuva distribuída e concentrada	78
Figura 4.11 - Representação da bacia do Córrego Cachoeirinha no modelo SWMM, considerando a chuva distribuída	79
Figura 4.12 - Representação da bacia do Córrego Cachoeirinha no modelo SWMM, considerando a chuva concentrada	79
Figura 5.1 - (A) Evento 05/03/18 10 min; (B) Evento 05/03/18 20 min; (C) Evento 05/03/18 30 min; (D) Evento 05/03/18 40 min; (E) Evento 05/03/18 50 min; (F) Evento 05/03/18 60 min.....	84
Figura 5.2 - Hietogramas de chuva do evento 05/03/2018 - evento 2.....	86

Figura 5.3 - (A) Evento 05/03/18 10 min - 360°; (B) Evento 05/03/18 20 min - 360°; (C) Evento 05/03/18 30 min - 360°; (D) Evento 05/03/18 40 min - 360°; (E) Evento 05/03/18 50 min - 360°; (F) Evento 05/03/18 60 min - 360°	100
Figura 5.4 - (A) Evento 05/03/18 10 min - 90°; (B) Evento 05/03/18 20 min - 90° ; (C) Evento 05/03/18 30 min - 90°; (D) Evento 05/03/18 40 min - 90°; (E) Evento 05/03/18 50 min - 90°; (F) Evento 05/03/18 60 min - 90°	101
Figura 5.5 - (A) Evento 05/03/18 10 min - 180°; (B) Evento 05/03/18 20 min - 180°; (C) Evento 05/03/18 30 min - 180°; (D) Evento 05/03/18 40 min - 180°; (E) Evento 05/03/18 50 min - 180°; (F) Evento 05/03/18 60 min - 180°	102
Figura 5.6 - (A) Evento 05/03/18 10 min - 270°; (B) Evento 05/03/18 20 min - 270°; (C) Evento 05/03/18 30 min - 270°; (D) Evento 05/03/18 40 min - 270°; (E) Evento 05/03/18 50 min - 270°; (F) Evento 05/03/18 60 min - 270°	103

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1 - Pesquisas que investigaram a influência da distribuição espacial e temporal da precipitação na resposta hidrológica da bacia	30
Quadro 3.2 - Relação dos métodos de infiltração e parâmetro de entrada	41
Quadro 3.3 - Trabalhos de modelagem aplicando o SWMM e suas principais características.	45
Quadro 3.4 - Vantagens e desvantagens do método de tentativa e erro	49
Quadro 3.5 - Desvantagens e vantagens do procedimento automático de calibração parâmetros	50
Quadro 4.1 - Características da bacia do Córrego Cachoeirinha.....	57
Quadro 4.2 - Tipo de alerta e porcentagens dos níveis de alerta, das estações fluviométricas	62
Quadro 4.3 - Relação dos eventos observados utilizados em cada etapa metodológica	64
Quadro 4.4 - Coordenadas geográficas das estações do monitoramento hidrológico de Belo Horizonte	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Intervalos utilizados na análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros.....	72
Tabela 5.1 - Eventos que foram excluídos na pesquisa.....	81
Tabela 5.2 - Eventos observados, utilizados nas etapas da pesquisa com representação dos alertas emitidos	82
Tabela 5.3 - Parâmetros do modelo SWMM.....	88
Tabela 5.4 - Resultados da largura da bacia (W) para cada sub-bacias, em metro	89
Tabela 5.5 - Características dos eventos da calibração	92
Tabela 5.6 - Características dos eventos utilizados na geração de eventos sintéticos.....	97
Tabela 5.7 - Ângulos, Coeficientes de Determinação e sentido dos eventos	98
Tabela 5.8 - Resumo dos resultados da simulação – percentual de eventos que apresentaram alerta (%), por tipo de alerta	106
Tabela 5.9 - Avaliação geral dos alertas.....	107
Tabela 5.10 - Comparação entre os alertas gerados para chuva observada, distribuída e concentrada. A cor de fundo representa o alerta correspondente e o valor mostrado na tabela é o do COE para cada simulação.....	109

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 5.1 - Quantidade total de eventos que emitiram alertas, na série de dados de 2011 - 2019 - 58 eventos.....	80
Gráfico 5.2 - Evento do dia 17/02/2019	81
Gráfico 5.3 - Representação dos eventos disponíveis na pesquisa, que geraram alertas - 56 eventos	82
Gráfico 5.4 - Relação do COE por evento.....	90
Gráfico 5.5 - Relação do nível de água observado e simulado por evento, no procedimento de calibração dos parâmetros do modelo	91
Gráfico 5.6 - Correlação entre o nível de água observado e simulado.....	91
Gráfico 5.7 - Nível máximo <i>versus</i> COE	93
Gráfico 5.8 - Precipitação total do evento <i>versus</i> COE.....	93
Gráfico 5.9 - Duração do evento <i>versus</i> COE	94
Gráfico 5.10 - Intensidade <i>versus</i> COE	94
Gráfico 5.11 - Precipitação até o pico <i>versus</i> COE	95
Gráfico 5.12 - Tempo de ascensão <i>versus</i> COE	95
Gráfico 5.13 - Eventos selecionados para as simulações	96
Gráfico 5.14 - Simulação do evento 05/03/2018 - evento 2.....	104
Gráfico 5.15 - Simulação dos eventos sintéticos a 360°	105
Gráfico 5.16 - Simulação dos eventos sintéticos a 90°	105
Gráfico 5.17- Simulação dos eventos sintéticos a 180°	105
Gráfico 5.18 - Simulação dos eventos sintéticos a 270°	106
Gráfico 5.19 - Relação da chuva observada, distribuída e concentrada	110

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Área da sub-bacia (km ²)
A, B, C, D e E	Constantes da equação que calcula o ângulo do evento
a , b e c	São os parâmetros da equação do somatório dos desvios dos quadrados
cm	Centímetro
CN	Número da Curva
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COE	Coefficiente de Eficiência de <i>Nash e Sutcliffe</i>
dij	Distâncias entre os valores conhecidos e estimados
DESA	Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental
EHR	Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
HEC-HMS	<i>Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modelling System</i>
IDW	Inverso da Distância à Potência
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
K _c	Coefficiente de compacidade
l _e	Largura do retângulo equivalente (m)
m	Metro
MG	Minas Gerais
mm	Milímetro
MOUSE	<i>Model for Urban Sewers</i>
N	Número de estações com dados
n	Quantidade de amostras
NA	Nível de água
nt	Número de intervalos de tempo
O	Oeste
P	Perímetro da sub-bacia (km)
p	Precipitação na estação para cada intervalo de tempo (mm)
PBH	Prefeitura Municipal de Belo Horizonte
S	Sul

s ()	Denota a operação de somatório representando todas estações para um dado evento de chuva
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SWMM	<i>Storm Water Management Model</i>
T	Tempo do centróide do hietograma de chuva da estação
t	Intervalo de tempo (h)
USEPA	<i>United States Environmental Protection Agency</i>
UTM	Universal Transversa de Mercator
W	Largura de drenagem da bacia
w	Somatório dos desvios quadrados
$W_{cal(t)}$	Representa a variável calculada no tempo t das funções objetivo do processo de calibração dos parâmetros
W_m	Variável média das funções objetivo do processo de calibração dos parâmetros
$W_{obs(t)}$	Trata-se da variável observada no tempo t das funções objetivo do processo de calibração dos parâmetros
xi	Valores conhecidos
x e y	Coordenadas das estações
z	Valores estimados
\hat{z}	Valor interpolado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS	22
2.1	OBJETIVO GERAL	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3	REVISÃO DA LITERATURA	23
3.1	CONTEXTUALIZAÇÃO SOBRE INUNDAÇÕES	23
3.2	DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DA CHUVA	26
3.2.1	<i>Contextualização sobre a variabilidade da chuva no espaço-tempo e sua atuação na resposta hidrológica da bacia, em eventos de tempestade</i>	26
3.2.2	<i>Influência da distribuição espacial e temporal da precipitação na resposta hidrológica da bacia</i>	27
3.2.3	<i>Influência da representação da chuva na resposta dos modelos hidrológicos</i>	32
3.3	MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO DA CHUVA	34
3.4	MODELAGEM HIDROLÓGICA	37
3.5	MODELO SWMM	39
3.5.1	<i>Funcionamento do modelo</i>	39
3.5.2	<i>Simulações no SWMM</i>	41
3.5.3	<i>Trabalhos com aplicação do SWMM</i>	42
3.6	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE	46
3.7	CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO	47
3.7.1	<i>Calibração por tentativa e erro</i>	48
3.7.2	<i>Calibração automática</i>	49
3.8	PADRÕES ESPAÇO TEMPORAIS DA CHUVA	51
4	MATERIAIS E MÉTODOS	56
4.1	ÁREA DE ESTUDO	57
4.1.1	<i>Caracterização da área de estudo e localização</i>	57
4.1.2	<i>Exemplos de eventos que causaram inundação</i>	60
4.2	FONTE DOS DADOS, SELEÇÃO DOS EVENTOS E DEFINIÇÃO DO MODELO	60
4.2.1	<i>Fonte dos dados de entrada do modelo</i>	61
4.2.2	<i>Seleção dos eventos utilizados na pesquisa que geraram alertas e definição dos grupos de eventos observados utilizados em cada etapa metodológica</i>	61
4.2.3	<i>Definição do modelo hidrológico com a subdivisão da bacia hidrográfica do Córrego do Cachoeirinha</i>	65
4.3	DESCRIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO E CONSTRUÇÃO DOS HIETOGRAMAS DE CHUVA, PARA UTILIZAÇÃO NA MODELAGEM	66
4.4	MODELAGEM HIDROLÓGICA (SWMM)	69
4.4.1	<i>Verificação das opções de simulação do modelo (SWMM) e redistribuição da vazão de base</i>	71
4.4.2	<i>Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo</i>	72
4.4.3	<i>Calibração dos parâmetros do modelo</i>	73
4.4.4	<i>Simulação no SWMM dos eventos observados e sintéticos</i>	74

4.5	SIMULAÇÃO CHUVA DISTRIBUÍDA E CONCENTRADA	78
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
5.1	SELEÇÃO DOS EVENTOS	80
5.2	DESCRIÇÃO ESPACIAL E TEMPORAL DA PRECIPITAÇÃO E CONSTRUÇÃO DOS HIETOGRAMAS DE CHUVA, NO MODELO	83
5.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DO MODELO, E EVENTOS SELECIONADOS PARA SIMULAÇÕES	87
5.3.1	<i>Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros</i>	<i>87</i>
5.3.2	<i>Resultados da calibração dos parâmetros</i>	<i>88</i>
5.3.3	<i>Eventos selecionados para as próximas simulações no modelo</i>	<i>96</i>
5.4	SIMULAÇÃO DOS EVENTOS, OBSERVADOS E SINTÉTICOS, E ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS.....	98
5.5	SIMULAÇÃO DA CHUVA CONCENTRADA E DISTRIBUÍDA	108
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	112
6.1	CONCLUSÕES	112
6.2	RECOMENDAÇÕES	114
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
	APÊNDICE A: TABELAS RESUMO – EVENTOS QUE GERAM ALERTA DA SÉRIE DE DADOS DE SETEMBRO DE 2011 ATÉ MAIO DE 2019.....	125
	APÊNDICE B: TABELAS RESUMO – MAPAS DE CHUVA DOS EVENTOS ESCOLHIDOS PARA SIMULAÇÃO.....	130
	APÊNDICE C: GRÁFICOS DOS EVENTOS SINTÉTICOS PARA OS RESPECTIVOS ÂNGULOS DE ROTAÇÃO 360°, 90°, 180° E 270°	166

1 INTRODUÇÃO

Com o passar do tempo, o homem vem intensificando diversas modificações no meio ambiente para que o meio físico atenda às suas necessidades e usos. Tais alterações provocam transformações no equilíbrio dos sistemas naturais que, em função das características do território, da interação e magnitude dos eventos, agravados pelas mudanças climáticas, causam situações de vulnerabilidade que podem provocar desastres (BERTONE e MARINHO, 2013).

Por conseguinte, se faz necessário o entendimento dos desastres (avalanches, desabamentos, seca/escassez, oscilações sísmicas, reações vulcânicas, inundações, entre outros) decorrentes nas bacias. Os eventos de inundações são distinguidos como sendo o principal fenômeno que causa danos econômicos e perdas de vidas em todo o mundo (DOTTORI *et al.*, 2015).

O processo de urbanização, gera um aumento da impermeabilização dos solos e crescimento da população em áreas suscetíveis a inundações (SOUSA e GONÇALVES, 2018). Portanto, a frequência das inundações aumenta por causa dos impactos hidrológicos da urbanização. Na maioria das vezes, os sistemas de drenagem implantados nas cidades não estão preparados para ocorrência dos eventos de elevada magnitude, isso deve-se ao fato de serem projetados para atender a uma certa demanda da população, que vem aumentando substancialmente ao longo dos anos.

Desse modo, a gestão das águas pluviais e fluviais em regiões urbanas requer medidas preventivas de mitigação de impactos, causados por eventos de elevada magnitude, por meio de ferramentas que auxiliam o dimensionamento das estruturas do sistema de drenagem, ou a emissão de alertas, de forma a proteger a população que está em torno das margens dos cursos d'água.

Para o estudo dos eventos de inundações em bacias hidrográficas urbanas se faz necessário uma melhor compreensão dos padrões espaciais e temporais da precipitação e sua influência na resposta hidrológica da bacia, que é a representação do hidrograma (dados de vazão) ou linigrama (dados de nível d'água) do escoamento superficial (Zoccatelli *et al.*, 2011).

Em bacias urbanas, a ocorrência dos eventos de precipitação intensa é observada por um aumento instantâneo do escoamento superficial e resposta rápida da vazão. Sendo assim, são necessários modelos para simular os processos de escoamento rápido, para o desenvolvimento de pesquisas que proporcionam um melhor entendimento e previsão das inundações nas cidades (GARCIA e PAIVA, 2006).

Nesse sentido, essa pesquisa propõe uma metodologia para averiguar a influência da distribuição espacial e temporal da precipitação na resposta hidrológica da bacia durante a ocorrência dos eventos que geraram alertas. Para esse propósito, será realizada uma análise da distribuição espacial e temporal dos eventos de precipitação observados na bacia, e além disso será utilizado um modelo chuva-vazão calibrado e validado, definido na pesquisa realizada por Siqueira, Moura e Silva (2019), buscando compreender a dinâmica do comportamento da bacia, que será associada à descrição espacial e temporal dos eventos extremos observados.

Diante dessa problemática, para este estudo de caso, foi escolhida a bacia do córrego Cachoeirinha que se encontra no município de Belo Horizonte, MG. Ela foi escolhida devido aos registros decorrentes de inundações, ao uso e ocupação do solo quase todo consolidado, à presença de edificações comerciais, residenciais e industriais, baixo percentual de área verde e pelo fato de não existir pesquisas a respeito desse tema na região.

Portanto, dentro desse contexto surgem duas hipóteses principais, i) a distribuição espacial e temporal da precipitação, em uma bacia urbana de pequeno porte pode ter alguma influência na resposta hidrológica da bacia, relacionada à ocorrência dos eventos que emitiram alertas, ii) o modelo hidrológico consegue representar essas influências.

A resposta a essas hipóteses vão contribuir posteriormente com trabalhos que irão identificar a direção preferencial de formação dos alertas na bacia de estudo, além de fundamentar uma metodologia relacionada a essa temática, para aplicação em outras bacias urbanas.

Contando com a presente introdução, a dissertação foi estruturada em seis capítulos. O segundo capítulo aborda os objetivos geral e específicos da pesquisa. O terceiro capítulo descreve a revisão bibliográfica, que irá abordar os principais tópicos que contemplam esse estudo: distribuição espacial e temporal da precipitação, métodos de interpolação da chuva, modelagem hidrológica, o modelo *Storm Water Management Model* (SWMM), análise de

sensibilidade, calibração do modelo e padrões espaço-tempo da chuva. O quarto capítulo descreve os passos metodológicos realizados para atingir os objetivos propostos desse trabalho. O quinto capítulo mostra os resultados e discussões com a aplicação dos métodos propostos. O sexto capítulo faz conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

2.1 *Objetivo geral*

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar se existe influência da variação da precipitação no espaço-tempo na resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica urbana de pequeno porte.

2.2 *Objetivos específicos*

Os objetivos específicos deste estudo são:

- a) Analisar eventos extremos de precipitação que geraram alertas na bacia do Cachoeirinha, de forma a identificar cenários com distribuição espaço-tempo variável;
- b) Avaliar se o modelo utilizado é sensível para representar possíveis diferenças observadas na distribuição espacial e temporal;
- c) Verificar o desempenho do modelo considerando a chuva de forma distribuída espacialmente e homogênea em toda a bacia.

3 REVISÃO DA LITERATURA

Esse capítulo do trabalho descreve a contextualização e a fundamentação teórica dessa pesquisa. Primeiramente, será apresentada uma revisão de literatura sobre o termo inundação, contribuindo para melhor entendimento desse fenômeno, em bacias urbanas. Em seguida, é apresentada uma descrição sobre a distribuição espacial e temporal da chuva e sua influência na resposta hidrológica da bacia.

Para estudar a distribuição da chuva no espaço-tempo é preciso avaliar os métodos de interpolação da precipitação. Logo em seguida, é necessário conhecer os procedimentos de modelagem hidrológica. Para simulação dos eventos de inundações na bacia, será apresentado o modelo *Storm Water Management Model* (SWMM). O software faz transformação chuva-vazão, representando o escoamento superficial.

Posteriormente, é necessário fazer a análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo utilizado. Após, são considerados tópicos relacionados ao procedimento de calibração do modelo, de forma a encontrar os melhores parâmetros para que sejam realizadas as simulações. Na sequência é descrito o método de definição dos padrões espaço-tempo de formação da chuva, onde serão calculados os ângulos de formação da chuva, para criar cenários de análise da interferência da precipitação no espaço e no tempo na resposta hidrológica da bacia.

3.1 Contextualização sobre inundações

Os fenômenos de inundações fazem parte da história da humanidade. Ao longo dos anos os registros de ocorrência e quantidade de pessoas afetadas tem crescido significativamente. Esse cenário está relacionado com a urbanização desordenada, ocupação em regiões de risco e desmatamento (GOERL e KOBAYAMA, 2005). Para entender as tempestades que acarretam tais eventos é necessário o desenvolvimento de pesquisas relacionadas a essa temática. Inicialmente é importante uma contextualização sobre inundação, termo muito confundido com outras expressões.

Os termos relacionados a inundações no Brasil podem ser: enchente, cheia, inundação brusca e gradual, alagamento, entre outros. Devido à utilização de todos esses termos, existe divergência com relação à caracterização das inundações. Tal fato ocorre devido a traduções

erradas e adaptações mal empregadas dos termos derivados de línguas estrangeiras, como inglês e espanhol (GOERL e KOBİYAMA, 2005).

Com relação à aplicação dos termos enchente e inundação existem muitas dúvidas. Segundo Goerl e Kobiyama (2005), enchente acontece quando a água do rio é elevada até atingir a margem, porém sem transbordar para regiões adjacentes. Quando é evidenciado o transbordamento da água nas margens do curso d'água, considera-se que ocorreu uma inundação (Figura 3.1).

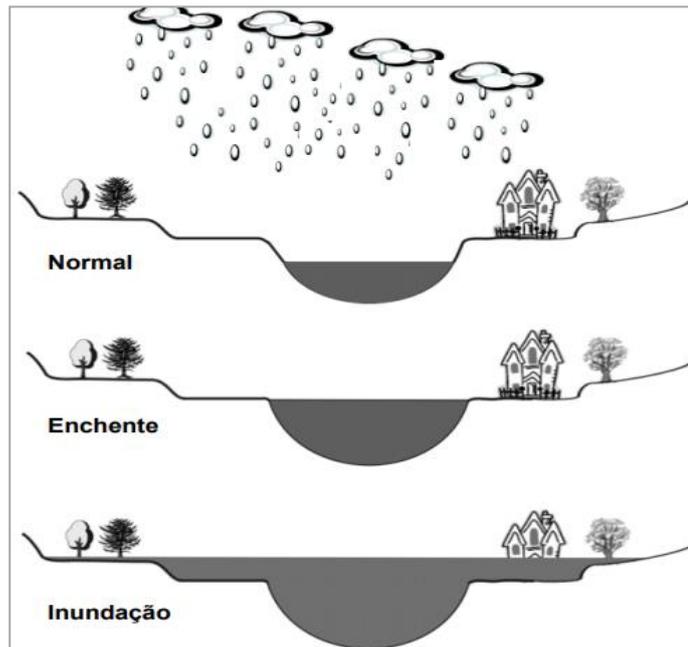


Figura 3.1- A elevação normal do nível do rio, causa enchente e inundação

Fonte: GOERL e KOBİYAMA, 2005.

As inundações podem ser classificadas como sendo graduais ou bruscas. Inundações graduais ocorrem de forma mais lenta. Em contrapartida, inundações bruscas são evidenciadas de forma rápida, em um curto intervalo de tempo (GOERL e KOBİYAMA, 2005).

Com o desenvolvimento das cidades, a camada superficial do solo vem passando por transformações que modificam o escoamento das águas pluviais, afetando o sistema de drenagem natural dos leitos dos rios e a recarga do lençol freático. Assim, são causados impactos pelas cidades, gerando enchentes e inundações (SOUSA e GONÇALVES, 2018). A inundação é um fenômeno variável e não-linear no espaço-tempo (DOUINOT *et al.*, 2015).

No Brasil, os registros de inundações dos últimos anos vêm aumentando, causando impactos na população, desabrigando milhares e levando à óbito centenas, mobilizando diversos segmentos sociais, acadêmicos e nos governos (BERTONE e MARINHO, 2013). A ocorrência de inundações na região de Belo Horizonte, em Minas Gerais, está relacionada principalmente com o relevo acidentado e impermeabilização do solo (SOUSA e GONÇALVES, 2018).

Segundo a reportagem do G1 Minas, do dia 01/02/2020, o Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet) informou, que a cidade de Belo Horizonte registrou 935,2 mm de chuva no mês de janeiro, quase o triplo da média esperada para o período (329,1 mm) na região. Com esse registro de precipitação, esse foi o mês de janeiro mais chuvoso da história da capital mineira. Ao longo do mês, foram registrados diversos temporais, causando 13 mortes, inundações, deslizamentos de terra e destruição de ruas e avenidas. A Figura 3.2 mostra o trabalho dos bombeiros procurando desaparecidos no bairro Jardim Alvorada, na Região da Pampulha, em Belo Horizonte. Já a Figura 3.3 mostra uma cratera na avenida Tereza Cristina, em Belo Horizonte.



Figura 3.2 - Busca dos bombeiros por vítimas, no bairro Jardim Alvorada, na Região da Pampulha, em Belo Horizonte

Fonte: G1 MINAS, 2020.



Figura 3.3 - Cratera na avenida Tereza Cristina, em Belo Horizonte

Fonte: G1 MINAS, 2020.

Na Figura 3.2 e 3.3 é possível verificar exemplos recentes dos impactos das inundações que ocorreram na cidade de Belo Horizonte, causando perdas de vida e materiais, respectivamente. Sendo assim, torna-se necessário estudos que avancem e contribuam com soluções para prevenção desses eventos de elevada magnitude.

O estudo da distribuição espacial e temporal da precipitação é importante para melhor compreensão da resposta hidrológica da bacia, para eventos de elevada magnitude, de forma a contribuir, por exemplo, com pesquisas que irão identificar a direção preferencial de formação dos alertas de inundação.

3.2 *Distribuição espacial e temporal da chuva*

Nesse tópico serão abordados três aspectos. No item 3.2.1, uma contextualização sobre a variabilidade da chuva no espaço-tempo e sua atuação na resposta hidrológica da bacia. Será apresentado no item 3.2.2, exemplos de estudos que consideram essa temática. Já no item 3.2.3 são descritas formas de representação da chuva dos modelos hidrológicos, distribuída e concentrada.

3.2.1 Contextualização sobre a variabilidade da chuva no espaço-tempo e sua atuação na resposta hidrológica da bacia, em eventos de tempestade

Em hidrologia urbana, processos característicos, como escoamento de águas pluviais, infiltração e evaporação, têm escala de variação no tempo e no espaço reduzidas, de horas a segundos e de centenas de metros a centímetros. Nessa escala o estudo da variabilidade espacial e temporal da precipitação e sua influência na resposta hidrológica da bacia é uma informação importante (CRISTIANO, VELDHUIS e GIESEN, 2017; TUCCI, 2005 e YOON e LEE, 2017).

A resposta de uma bacia é o resultado de diversas reações complexas entre processos hidrológicos na superfície terrestre, como chuva e radiação e elementos da paisagem, vegetação, topografia e propriedades do solo (WOODS e SIVAPALAN, 1999). Em estudos de eventos de tempestade, a resposta hidrológica da bacia é a representação do hidrograma de formação do escoamento superficial, que tem como fatores de influência, por exemplo, a vazão de pico, o tempo ao pico, o volume escoado, entre outros.

Verificou-se que a sensibilidade da resposta hidrológica à variabilidade espacial e temporal das chuvas pode estar ligada ao tamanho da área. Portanto, observou-se que, à medida que a área de drenagem da bacia aumenta, a importância da distribuição espacial das chuvas diminui, tornando a distribuição temporal um fator de maior relevância (SEGOND, WHEATER e ONOF, 2007; NICÓTINA *et al.*, 2008; OCHOA-RODRIGUEZ *et al.*, 2015 e CRISTIANO, VELDHUIS e GIESEN, 2017).

O impacto da variabilidade temporal e espacial das chuvas sobre a resposta hidrológica de bacias urbanas ainda permanece pouco compreendido (CRISTIANO, VELDHUIS e GIESEN, 2017; EMMANUEL *et al.*, 2015 e KLONGVESSA, LU e CHOTPANTARAT, 2018).

Ochoa-Rodriguez *et al.* (2015) afirmam que em geral, as variações na resolução temporal das chuvas afetam os resultados da modelagem hidrodinâmica. A resolução temporal das chuvas, para eventos de elevada magnitude, são identificadas em tempos de duração menor que 10 minutos.

Em áreas urbanizadas, a representação da variabilidade espacial e temporal da precipitação é um fator de difícil determinação, devido à falta, em diversas regiões, de uma rede densa de pluviômetros, pluviógrafos e, quando possível, radar metodológico, dificultando a previsão dos eventos de inundação (NIAZI *et al.*, 2017; TUCCI, 2005 e YOON e LEE, 2017).

Apesar dos pluviômetros serem um dos equipamentos de medição de chuva mais utilizados na estimação da precipitação, os radares meteorológicos também podem ser utilizados para representar a variabilidade espacial da precipitação. Entretanto, os radares ainda precisam ser associados a redes pluviométricas para melhorar a estimativa do volume de chuva medido. O mesmo que ocorre com os radares é também observado com os satélites, que vêm cada vez mais sendo utilizados (CRISTIANO, VELDHUIS e GIESEN, 2017).

3.2.2 Influência da distribuição espacial e temporal da precipitação na resposta hidrológica da bacia

Com relação ao tamanho das bacias hidrográficas, considera-se bacias pequenas regiões de até 300 km², para áreas acima desse valor a bacia já pode ser considerada grande (EMMANUEL, *et al.*, 2015).

A seguir serão apresentadas, de forma sucinta, metodologias que levaram em consideração a variação da precipitação no espaço-tempo como fator de influência na resposta hidrológica da bacia em procedimentos de modelagem chuva-vazão. Os estudos são apresentados na ordem cronológica de acordo com a ferramenta de medição de chuva utilizada.

Os autores Wilson, Valdes e Rodriguez-Iturbe (1979) realizaram uma pesquisa em Porto Rico, na região nordeste no rio *Fajardo*, em uma área que abrange 68,63 km². A investigação enfoca a relevância da precisão da precipitação na modelagem chuva-vazão de uma bacia de pequeno porte. O trabalho foi realizado utilizando um modelo determinístico chuva-vazão e um modelo multidimensional de geração de chuva, que gerou um campo de chuva sintético, servindo como entrada no modelo chuva-vazão.

Dessa maneira, a atuação da distribuição espacial e temporal foi analisada por meio de registros pluviométricos. Os resultados mostraram uma forte influência da distribuição espacial da chuva na resposta hidrológica, pois trata-se de uma bacia de pequena extensão, favorecendo assim o reconhecimento da influência espacial da chuva na região. De acordo com Wilson, Valdes e Rodriguez-Iturbe (1979) e Mateo-Lázaro *et al.* (2014) com relação ao hidrograma, observou-se uma maior variação da vazão de pico. Foi também constatado que a qualidade dos dados de entrada de chuva são importantes para os procedimentos de modelagem (WILSON, VALDES e RODRIGUEZ-ITURBE, 1979).

Outros estudos de aplicação que consideraram a variabilidade da tempestade por meio de pluviômetros foram, Faurès *et al.* (1995); Nicótina *et al.* (2008); Mateo-Lázaro *et al.* (2014) e Klongvessa, Lu e Chotpantararat (2018). Todos os estudos tiveram resultados favoráveis utilizando os pluviômetros como equipamento de medição de chuva no procedimento de modelagem do escoamento superficial. Conforme Faurès *et al.* (1995) e Klongvessa, Lu e Chotpantararat (2018) a característica de maior impacto no hidrograma foi o volume escoado. Já para no estudo de Nicótina *et al.* (2008) o hidrograma sofre maior variação com relação ao tempo ao pico.

Zoccatelli *et al.* (2010) pesquisaram a relação existente entre a distribuição espacial e temporal da precipitação, a morfologia e a resposta hidrológica da bacia. Inicialmente, foram analisados três eventos de elevada magnitude que geraram rápidas inundações na Romênia entre os anos de 2005-2007 em bacias hidrográficas com extensão entre 36 e 167 km².

A investigação foi realizada por meio de informações de precipitação utilizando radar, juntamente com um modelo hidrológico distribuído, com intuito de verificar o quanto as estatísticas espaciais de precipitação conseguem descrever a distribuição da chuva no espaço-tempo. Os resultados constataram a influência da distribuição espacial e temporal da precipitação na resposta hidrológica da bacia, com relação ao hidrograma, o tempo ao pico foi a característica mais impactada (ZOCCATELLI *et al.*, 2010). Outras aplicações do uso de radar, que obtiveram bons resultados, e que também constataram que o tempo ao pico foi o fator mais afetado na formação do hidrograma foram Zoccatelli *et al.* (2011); Bruni *et al.* (2015); Emmanuel *et al.* (2015) e Ochoa-Rodriguez *et al.* (2015).

A análise que foi realizada por Segond, Wheater e Onof (2007) teve como abordagem a avaliação da precipitação espacial e temporal na formação do escoamento superficial. Dessa forma, a pesquisa teve como referência dados de radar e pluviômetros, em uma bacia hidrográfica de 1.040 km². Por meio de registros de precipitação, foi feita a modelagem semi-distribuída chuva-vazão, utilizando o modelo *RunOff Routing B6700*. Na análise foi considerado um índice de variabilidade espacial, determinado pela influência da precipitação de referência (rede de pluviômetros) e posteriormente foi definido o critério de eficiência de Nash e Sutcliffe.

Esse critério estabeleceu o desempenho entre o escoamento simulado de referência e o testado por meio de registros alternativos, sendo então possível verificar as influências da variabilidade espacial e temporal da precipitação em toda a escala da bacia. Os autores concluíram que como a escala da bacia investigada era extensa, a precipitação espacial foi sendo considerada menos importante na análise, tornando o tempo de resposta um fator de maior influência na formação do hidrograma do escoamento (SEGOND, WHEATER e ONOF, 2007).

Outros trabalhos que abordaram essa temática e consideraram o uso do pluviômetro com radar, obtendo resultados favoráveis, e encontrando como fator de maior influência no hidrograma do escoamento superficial o tempo ao pico foram, Garambois *et al.* (2014) e Silvestro *et al.* (2016). Já na pesquisa de Douinot *et al.* (2015), que também utilizou o pluviômetro com radar, obtendo bons resultados, o fator do hidrograma que teve maior influência foi a vazão de pico.

Gilewski e Nawalany (2018) fizeram uma modelagem hidrológica em regiões montanhosas, onde se exige uma confiabilidade maior em relação aos dados de precipitação no espaço e no tempo, tendo em vista que a resposta hidrológica dessas bacias é muito rápida. A região de aplicação do estudo foi a bacia hidrográfica de *Upper Skawa*, com uma área total de 240,4 km², montanhosa no sul da Polônia. O objetivo foi analisar e comparar o desempenho das estimativas de pluviômetro, radar e satélite para modelagem de escoamento baseada em eventos em uma pequena região montanhosa. Para realização da modelagem foi utilizado o *Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modelling System (HEC-HMS)*, calibrado e validado para o intervalo de 2014 a 2016.

De acordo com os resultados, para modelagem dos eventos, as estimativas de precipitação de radar ajustada assim como a estimativa de precipitação de satélite foram fontes de dados de precipitação mais confiáveis. Para cada instrumento de medição o modelo foi calibrado de forma separada, identificando que as distribuições espaciais e temporais da precipitação tiveram um impacto significativo nos valores estimados dos parâmetros do modelo. Já com relação ao hidrograma observou-se uma variação maior em relação ao tempo ao pico, e uma menor variação da vazão de pico (GILEWSKI e NAWALANY, 2018).

Com intuito de demonstrar um resumo dos trabalhos pesquisados que abordaram a temática em questão, o Quadro 3.1, apresenta os autores com os respectivos anos de publicação dos artigos (organizados na ordem cronológica, conforme o equipamento de estimação de chuva), país, área da bacia e ferramentas de investigação da precipitação.

Quadro 3.1 - Pesquisas que investigaram a influência da distribuição espacial e temporal da precipitação na resposta hidrológica da bacia

Referência	Local	Área (km ²)	Ferramentas para estimar a precipitação
Faurès <i>et al.</i> (1995)	Estados Unidos da América	0,044	Pluviômetro
Wilson, Valdes e Rodriguez-Iturbe (1979)	Porto Rico/Estados Unidos da América	68,63	
Nicótina <i>et al.</i> , 2008	Itália	*1560 - 8000	
Mateo-Lázaro <i>et al.</i> , 2014	Espanha	*14,49 - 18,51	
Klongvessa, Lu e Chotpantarat (2018)	Tailândia	24000	

Referência	Local	Área (km ²)	Ferramentas para estimar a precipitação
Zoccatelli <i>et al.</i> (2010)	Romênia	*36 - 167	Radar
Zoccatelli <i>et al.</i> (2011)	Itália, Eslovênia e Romênia	*36 - 982	
Bruni <i>et al.</i> (2015)	Holanda	3,4	
Ochoa-Rodriguez <i>et al.</i> (2015)	Holanda	*3 - 8	
Emmanuel <i>et al.</i> (2015)	França	*10 - 270	
Segond, Wheeler e Onof, (2007)	Reino Unido	1040	Pluviômetro e Radar
Garambois <i>et al.</i> (2014)	França	2786	
Douinot <i>et al.</i> (2015)	Estados Unidos da América	*195 - 622	
Silvestro <i>et al.</i> (2016)	Itália	98	
Gilewski e Nawalany (2018)	Polônia	240,4	Pluviômetro, Radar e Satélite

*Bacias com áreas que variam entre o intervalo estipulado

De acordo com as pesquisas realizadas no Quadro 3.1, concluiu-se que a variabilidade espacial e temporal da precipitação, em todos os estudos tiveram influência na resposta da bacia e a mesma, na maioria das vezes, está ligada à extensão da área. Com relação a formação do hidrograma do escoamento superficial, a característica mais influenciada foi o tempo ao pico, conforme pode ser verificado nas pesquisas realizadas por: Nicótina *et al.*, (2008); Zoccatelli *et al.* (2010); Zoccatelli *et al.* (2011); Garambois *et al.* (2014); Bruni *et al.*(2015); Ochoa-Rodriguez *et al.* (2015); Emmanuel *et al.* (2015); Silvestro *et al.* (2016) e Gilewski e Nawalany (2018).

Observado as pesquisas do Quadro 3.1, os estudos que utilizaram dados de pluviômetros, conseguiram demonstrar a influência da distribuição temporal e espacial da precipitação na resposta hidrológica das bacias. Portanto, nesse trabalho espera-se que os resultados, utilizando dados pluviométricos, consigam representar o escoamento superficial dos eventos

observados de elevada magnitude, na região de estudo, identificando possíveis influências da variabilidade da chuva no espaço-tempo na resposta hidrológica da bacia.

3.2.3 Influência da representação da chuva na resposta dos modelos hidrológicos

Os autores Dawdy e Bergman (1969); Wilson, Valdes e Rodriguez-Iturbe (1979) e Beven e Hornberger (1982) afirmam que uma estimativa precisa da variação espacial das chuvas é um pré-requisito para a simulação do escoamento superficial.

Porém, o estudo da melhor forma de representação da variabilidade espacial da chuva na modelagem do escoamento superficial é uma discussão histórica, que ainda não tem uma conclusão efetiva. O modelo adotando a chuva distribuída, considera um pluviômetro em cada sub-bacia. Já a chuva concentrada é localizada em apenas um pluviômetro, como se a chuva tivesse um comportamento homogêneo em toda a bacia.

Dawdy e Bergmann (1969) representaram a modelagem do escoamento superficial de forma concentrada, em um único pluviômetro, e obteve o pico da vazão com um erro padrão da estimativa da ordem de 20%, limitando a precisão da simulação do escoamento na maioria dos casos. Wilson, Valdes e Rodriguez-Iturbe (1979) compararam hidrogramas simulados gerados usando como entrada a chuva distribuída e concentrada para uma mesma tempestade. Os autores concluíram que na estimativa das tempestades a representação da chuva distribuída se sobre saiu melhor, porém não existe uma diferença muito grande na obtenção dos resultados se comparadas as duas entradas.

Já para Beven e Hornberger (1982) o modelo foi montado considerando a chuva concentrada. Os resultados apontaram erros na estimativa do escoamento superficial. Os autores sugeriram trabalhar com a chuva de forma distribuída o que poderia levar uma melhoria nos resultados das simulações. Na pesquisa de Emmanuel *et al.* (2015) foi utilizado um modelo distribuído, considerando vários tipos de chuva na simulação do escoamento superficial. Os resultados indicaram que para precipitações com menor variabilidade espacial as diferenças entre os hidrogramas distribuídos e concentrados são pequenas.

Por fim, Emmanuel *et al.* (2016) compararam a representação do escoamento superficial no modelo utilizando a chuva distribuída e concentrada. O modelo distribuído obteve uma melhor

representação espacial da precipitação, porém os resultados para ambas as simulações não diferem muito. Na sequência alguns desses trabalhos já citados foram mais detalhados.

Beven e Hornberger (1982) realizaram uma pesquisa em uma bacia com extensão de 287 km² na Virginia. O objetivo do estudo foi avaliar os efeitos do padrão de chuvas nos hidrogramas para tempestades convectivas de verão. Um procedimento misto de modelagem determinística / estocástica foi utilizado para gerar hidrogramas resultantes de tempestades de diferentes padrões, e o modelo foi representado considerando a chuva concentrada. Na avaliação dos resultados, os erros nas simulações do escoamento superficial no modelo foram esperados devido a quantidade de pluviômetros na região não ser representativa. O artigo sugere que a incorporação de dados distribuídos levaria a melhoria na simulação dos hidrogramas do escoamento superficial.

Emmanuel *et al.* (2015) realizaram um estudo na França em áreas com extensão variando entre 10 km² até 300 km². O objetivo foi avaliar a capacidade de uma abordagem de simulação para oferecer uma melhor compreensão da influência da variabilidade espacial da chuva na modelagem de hidrogramas. Esse estudo avaliou vários tipos de chuvas, na simulação do escoamento superficial, utilizando um modelo distribuído e concluiu que para campos de precipitação menos variáveis, ou seja, quando a precipitação é espacialmente uniforme sobre a bacia hidrográfica, as diferenças entre hidrogramas distribuídos e concentrados são pequenas. À medida que a variabilidade espacial das chuvas aumenta, as diferenças entre hidrogramas modelados distribuídos e concentrados são maiores. Na pesquisa dos autores, para uma área de 30 km² a diferença entre os hidrogramas considerando a chuva distribuída e concentrada são pequenas. Já para áreas com extensão de 90 km² e 270 km² a chuva distribuída tem uma melhor representação do hidrograma.

No trabalho de Emmanuel *et al.* (2016) foram consideradas três bacias hidrográficas: *Gardon* (1.858 km²), *Ceze* (1.355 km²), e *Vidourle* (798 km²) localizadas na França. No procedimento de análise do escoamento superficial a chuva foi considerada de forma concentrada e distribuída. Os resultados das simulações, considerando a chuva distribuída e concentrada foram próximos. No entanto, o modelo distribuído teve uma melhor representação do escoamento superficial. Porém, o modelo concentrado pode se beneficiar por ser um procedimento de implementação da modelagem mais simples.

Em todos os trabalhos citados anteriormente, mesmo aqueles que definem que a chuva distribuída se sobressaiu melhor nos resultados da modelagem do escoamento superficial dos eventos de tempestade se comparada a concentrada, nenhuma pesquisa faz uma conclusão concreta a respeito dessa temática.

Portanto, existe uma dificuldade envolvida em gerar conclusões gerais robustas estudando apenas alguns eventos de chuva, o que também ajuda explicar as diversas conclusões alcançadas na literatura.

3.3 Métodos de interpolação da chuva

No procedimento de modelagem hidrológica é necessário a criação de um campo de chuva, para melhor representação espacial e temporal da precipitação. O correto para melhor representação do escoamento superficial seria na região a ser analisada ter dados de chuva distribuídos, mas o cenário mais comum observado são os dados pontuais, localizados nos pluviômetros. Portanto, se faz necessário realizar a distribuição espacial-temporal da chuva utilizando métodos de interpolação da precipitação.

Os métodos de interpolação da chuva são utilizados em regiões contendo informações de dados pontuais de uma determinada variável para estimar valores de precipitação em toda a área a ser analisada (RIGHI e BASSO, 2016).

A interpolação espacial de informações pluviométricas pode ser aplicada tanto no ramo da hidrologia quanto da meteorologia. Sendo assim, mapas de chuva são importantes para averiguação das informações climatológicas dos eventos extremos, que servem como subsídio de entrada no procedimento de modelagem hidrológica e na previsão do tempo (AHRENS, 2005).

Em procedimentos de previsão de inundações, os mapas devem ser construídos em tempo real. A maior parte dos dados são provenientes de pluviômetros. Porém, para produção dos mapas com maior precisão se faz necessário uma rede densa de pluviômetros disponíveis que, na maioria das vezes, é inexistente. Sendo assim, é necessário uma busca por informações em regiões mais distantes do local o que dificulta a confiabilidade dos resultados da interpolação realizada (AHRENS, 2005 e LUCAS *et al.*, 2013).

Erros de medição de chuva podem ocasionar diversas imprecisões (como por exemplo, hidrogramas tendenciosos). Os maiores problemas da estimação de chuvas estão ligados a bacias com ocorrência de chuvas orográficas e convectivas, que são constituídas por um gradiente espacial maior (TUCCI, 2005).

A distribuição dos diversos tipos de precipitação necessita de um método de interpolação que consiga representar bem a situação em estudo, proporcionando a melhor compreensão da variabilidade espacial do evento com durações diversas (LUCAS *et al.*, 2013). Portanto, diante desse cenário, é necessária a utilização de métodos de interpolação de forma a espacializar as informações disponíveis em determinada região.

Existem três métodos tradicionais para estimar a precipitação em determinada região: método da média aritmética, método de Thiessen e método das isoietas. O método da média aritmética é de simples aplicação para quantificação da chuva, englobando a média das alturas de precipitação registradas. Essa medida é aplicável se medidores forem uniformemente distribuídos sobre a área (CHOW, MAIDMENT e MAYS, 1988). Já a descrição do funcionamento dos métodos de estimação da precipitação, Thiessen e isoietas, pode ser verificada, por exemplo, em Tucci (2005).

Todavia, com o avanço do Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e o desenvolvimento das ferramentas de geoprocessamento, ambos vêm contribuindo para a implementação da geoestatística no ramo da modelagem de informações espaciais, possibilitando a transformação de dados discretos em contínuos através das técnicas de interpolação matemática de informações pontuais (LUCAS *et al.*, 2013).

Embora existam diversos métodos de interpolação, como por exemplo, o da Krigagem e a Interpolação pela Ponderação do Inverso da Distância (IDW), ambos são comumente utilizados para produzir superfícies distribuídas de uma certa variável utilizando dado pontual de precipitação, além de serem métodos que estão disponíveis para serem aplicados em *software*, por exemplo, ArcMap (versão 10.5) (RIGHI e BASSO, 2016).

O método de interpolação espacial IDW é um dos mais aplicados por ser rápido e de fácil interpretação. Trata-se de um método tipicamente determinista, o qual aplica a distância geográfica como parâmetro de interpolação (LU e WONG, 2008). De acordo com Righi e

Basso (2016), nessa metodologia é atribuído um valor para um local não medido, por meio de valores amostrados à sua volta, ou seja, cada ponto possui uma influência no novo ponto, que diminui na medida que a distância aumenta.

Dessa maneira, a influência atribuída a cada ponto torna-se proporcional ao inverso da distância entre esses pontos. Sendo assim, para aplicação do método IDW, devem ser definidos alguns parâmetros de interpolação. O valor mínimo e máximo dos vizinhos utilizados na interpolação, que definem respectivamente, o número mínimo e máximo de pontos que vão influenciar na estimação dos valores encontrados na interpolação. O valor do coeficiente de potência (α) é um coeficiente de ponderação, utilizado na estimação dos valores a serem interpolados com base em pontos conhecidos (VARGAS *et al.*, 2018).

De acordo com Landim (2000) e ArcMap (versão 10.5) ao aplicar o método de interpolação IDW o valor padrão adotado para o coeficiente de potência é $\alpha = 2$. Na Equação 3.1 é possível verificar a fórmula de aplicação do método IDW.

$$\hat{Z}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n Z(x_i) \frac{1}{d_{ij}^\alpha}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{ij}^\alpha}} \quad (3.1)$$

Sendo:

\hat{z} = valor interpolado;

z = valores estimados;

n = quantidade de amostras;

x_i = valores conhecidos;

d_{ij} = distâncias entre os valores conhecidos e estimados;

α = coeficiente de potência.

Lu e Wong (2008) desenvolveram um trabalho em *Taiwan*, que teve como objetivo melhorar a técnica de interpolação espacial IDW, utilizando dados de precipitação. Os autores concluíram que o método IDW produz resultados satisfatórios quando os dados disponíveis são muito limitados.

Já Chen e Liu (2012) em uma pesquisa realizada em *Taiwan*, utilizando o método de interpolação de dados IDW, concluíram que o método é adequado para realização de interpolação de dados de chuva.

Uma das principais incertezas observadas associada ao método de interpolação IDW é com relação ao erro da estimativa, pois trata-se de um método que não a leva em consideração (HARTKAMP *et al.*, 1999).

De acordo com Gilewski e Nawalany (2018) o método IDW é uma técnica recomendada na estimação da distribuição espacial e temporal da precipitação. Por conseguinte, considerando todos fatos apresentados, pode-se concluir que o método de interpolação de dados de chuva IDW pode ser utilizado para o objetivo proposto nesse trabalho.

3.4 Modelagem Hidrológica

As técnicas computacionais em conjunto com a disponibilidade de informações digitais espacialmente distribuídas são fatores que contribuem para o desenvolvimento dos modelos hidrológicos (ELGA, JANB e OKKE, 2015).

Os modelos hidrológicos foram criados com intuito de entender o comportamento dos fenômenos de uma bacia hidrográfica, prevendo condições distintas das observadas. Por conseguinte, o foco de um modelo de drenagem urbana é a representação do escoamento superficial conforme a superfície do terreno, representando sua velocidade, níveis, vazões, volumes, a infiltração (ainda que em um percentual baixo existente em áreas urbanizadas), e a evapotranspiração, de forma a realizar previsões de inundações, verificação da qualidade da água, erosão e sedimentação, nutrientes e distribuição de pesticidas, utilização da terra, mudanças climáticas, entre outros aspectos (DEVIA, GANASRI e DWARAKISH, 2015; RIGHETTO, 2009 e TUCCI, 2005). A Figura 3.4 apresenta as etapas de simulação que devem ser consideradas em um modelo hidrológico.

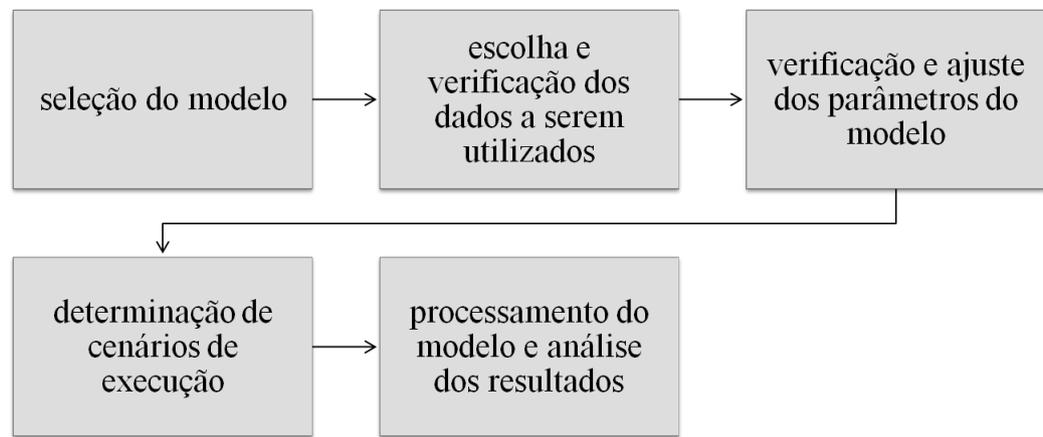


Figura 3.4 - Etapas de modelagem hidrológica

Fonte: TUCCI, 2005.

Porém, ainda não existe uma metodologia que possa simular de forma geral o sistema hídrico urbano por completo (ELGA, JANB e OKKE, 2015). O volume de informações e sua representatividade para realizar o ajuste e as verificações de um modelo hidrológico é de extrema importância para gerar um resultado de qualidade, e o mais próximo possível da realidade. Portanto, a confiabilidade dos dados é um fator de forte limitação em procedimentos de modelagem (TUCCI, 2005 e ELGA, JANB e OKKE, 2015).

Em geral, os dados de entrada do modelo são a precipitação, temperatura do ar, as características do solo, topografia, vegetação, hidrogeologia e diversos parâmetros físicos (DEVIA, GANASRI e DWARAKISH, 2015).

Os modelos chuva-vazão podem ser considerados como determinísticos e estocásticos, sendo que nesse último diversas saídas podem ser geradas apenas por um único grupo de entrada. Porém, o determinista é característico por um conjunto único de valores de entrada gerando apenas uma saída (DEVIA, GANASRI e DWARAKISH, 2015 e RIGHETTO, 2009).

Em diversas aplicações em vários setores dos recursos hídricos são utilizados os modelos chuva-vazão. Os modelos hidrológicos são constituídos por parâmetros que são importantes na caracterização de uma determinada bacia, sendo necessário um ajuste de acordo com os dados observados de vazão (COLLISCHONN e TUCCI, 1998).

São exemplos de modelo hidrológico: *Model for Urban Sewers* (MOUSE), *Hydrological Model System* (HEC-HMS) e o *Storm Water Management Model* (SWMM) (FORMIGA *et al.*, 2016). Em Righetto (2009) e Elliott e Trowsdale (2007), também há apresentação de

alguns modelos e uma breve descrição de cada um deles.

Algumas das limitações presentes em procedimentos de modelagem hidrológica podem ser em relação à dificuldade de utilização do modelo e à necessidade de um grande conjunto de dados. As alterações climáticas e a heterogeneidade do solo têm um papel importante na estimação do escoamento superficial e são fatores complexos de serem considerados nos modelos hidrológicos (DEVIA, GANASRI e DWARAKISH, 2015).

Dentre os diversos tipos de modelos hidrológicos existentes, será mais detalhado nessa pesquisa o modelo *Storm Water Management Model* (SWMM). Trata-se de um modelo chuva-vazão que representa a quantidade e qualidade do escoamento superficial.

3.5 Modelo SWMM

Essa etapa descreve sobre o modelo SWMM. O item 3.5.1 apresenta um pouco sobre o funcionamento do programa. O item 3.5.2 expõe detalhes que devem ser considerados nas simulações como o *software*. E por fim, o item 3.5.3 apresenta exemplos de trabalhos que aplicaram o mesmo, com intuito de demonstrar que o modelo SWMM é bastante empregado em estudos de modelagem hidrológica.

3.5.1 Funcionamento do modelo

O modelo do *Storm Water Management Model* (SWMM) surgiu no início da década de 1970, desenvolvido pela *United States Environmental Protection Agency* (USEPA), recebendo inúmeras atualizações, por meio dessa agência e outras instituições que executam serviços de desenvolvimento de aplicativos. Seu código de programação é livre, aceitando alterações, sendo bastante aplicado em simulações de drenagem urbana. O *software* é disseminado, incluindo vários módulos, propiciando diversas pesquisas em hidrologia urbana e qualidade da água, ou seja, o modelo calcula as vazões, os níveis d'água e a qualidade d'água nos condutos e canais para cada intervalo de tempo durante a simulação. (RIGHETTO, 2009).

No modelo SWMM, a variabilidade espacial é representada por meio da divisão de uma área de estudo, em subáreas reduzidas e homogêneas, formando um grupo de sub-bacias hidrográficas, as quais obtêm um percentual de subáreas permeáveis e impermeáveis que

recebem precipitações produzindo escoamento e cargas poluidoras. Podendo conceber um evento chuvoso único ou uma verificação contínua de longo prazo (ROSSMAN, 2012).

A estrutura do modelo pode ser representada por nove blocos, onde quatro são de cálculo computacional e cinco de serviços, contando com a contribuição de um módulo executivo. Os módulos de cálculo computacional são: "*Runoff*" é responsável pela transformação da chuva em vazão, o "*Transport*", utiliza o método da onda cinemática para modelar o transporte da rede de drenagem, o "*Extran*", executa em condutos e canais a modelagem hidrodinâmica, e por fim o "*Storage/Treatment*", que tem a função de executar os procedimentos de qualidade das águas (HUBER e DICKINSON, 1992).

A Figura 3.5 mostra um esquema conceitual de representação do escoamento superficial no SWMM. As sub-bacias são tratadas como sendo um reservatório não linear. O sistema conta com contribuições de diferentes tipos de precipitações (chuva, neve) e de qualquer outra sub-bacia situada a montante. Existem vários fluxos de saída como a evaporação, a infiltração e o escoamento superficial. O valor máximo do armazenamento em depressões representa a capacidade desse "reservatório", trata-se do valor máximo armazenável na superfície por alagamento, encharcamento e interceptação. Sendo assim, o escoamento superficial " Q " para cada unidade de área acontece quando a profundidade da água nesse "reservatório" ultrapassa o valor máximo do armazenamento em depressões " d_p ". Dessa maneira, " Q " é calculado utilizando a equação de Manning. A lâmina de água do reservatório " d " (em pés ou metros) na sub-bacia é recalculada de forma contínua, com tempo t (em segundos) por meio da solução numérica do balanço hídrico na sub-bacia (ROSSMAN, 2012).

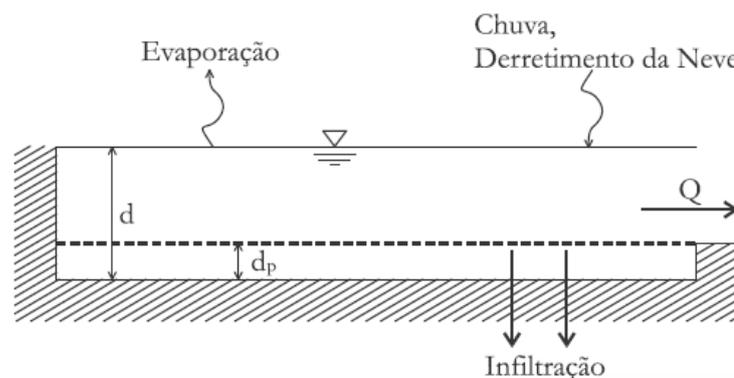


Figura 3.5 - Esquema de representação do escoamento superficial no SWMM
Fonte: Adaptado de Rossman (2012).

3.5.2 Simulações no SWMM

Para Garcia e Paiva (2006), os modelos distribuídos, com a área dividida em sub-bacias, são os mais recomendados na representação do ambiente urbano. As sub-bacias podem ser repartidas em três zonas, considerando uma área permeável e duas impermeáveis, uma contendo e outra, sem armazenamento em depressões (NIAZI *et al.*, 2017).

Após, é definido o modelo de infiltração (Horton, Green Ampt e Número da Curva), responsável pelo controle da precipitação na camada superior do solo. Logo a seguir, o Quadro 3.2 representa os métodos de infiltração, presentes no SWMM, e seus respectivos parâmetros de entrada (ROSSMAN, 2012).

Quadro 3.2 - Relação dos métodos de infiltração e parâmetro de entrada

Modelo de infiltração	Parâmetro de entrada
Horton	taxa de infiltração máxima e mínima, coeficiente de decaimento e tempo de secagem do solo saturado.
Green Ampt	déficit inicial de umidade do solo, condutividade hidráulica do solo e o potencial matricial de acordo com o umedecimento.
Número da Curva	o número de CN e o tempo que leva um solo saturado para secar completamente.

Fonte: Adaptado de Rossman (2012).

Em seguida, o escoamento superficial é simulado. Dentro das opções de simulação do SWMM é necessário determinar qual processo físico (chuva/vazão, degelo e neve, água subterrânea, propagação de fluxos e qualidade da água) que será empregado conforme o projeto de execução (ROSSMAN, 2012).

Por fim, deve ser definido o modelo de propagação do fluxo (regime uniforme, onda cinemática e onda dinâmica) que determina a simulação hidráulica do fluxo fazendo uso da rede dos condutos (ROSSMAN, 2012).

O regime uniforme é a representação mais simples para o transporte da água, sendo o escoamento uniforme e permanente em cada intervalo de tempo. Para correlacionar a área, a vazão e a profundidade do conduto, aplica-se a equação de Manning. Podendo ser aplicado

somente em sistemas ramificados, sendo insensível ao intervalo de tempo escolhido. Usado apenas em análises preliminares em simulações extensas (ROSSMAN, 2012).

Já o modelo da onda cinemática trabalha com a equação da continuidade em parceria com a formulação simplificada da equação da quantidade de movimento em cada conduto. A vazão máxima no conduto é concebida pela equação de Manning. É mais aplicado em redes ramificadas, e considera intervalos de tempo de cálculo na ordem de 5 a 15 minutos (ROSSMAN, 2012).

O modelo da onda dinâmica aplica equações unidimensionais de Saint Venant, proporcionando resultados mais precisos. A vazão do conduto é obtida por meio da equação de Manning. Sendo empregado em qualquer percurso de rede de drenagem, bastante apropriado em sistemas que consideram o ressalto hidráulico e remanso tendo como origem controles a jusante ou elementos de controle de fluxo tais como orifícios e vertedores (ROSSMAN, 2012).

Os parâmetros principais das sub-bacias que são calibráveis são: % de área impermeável, CN (parâmetro de infiltração), coeficiente de rugosidade dos condutos (n), coeficiente de Manning para área impermeável (n -impermeável); coeficiente de Manning para a área permeável (n -permeável); armazenamento em depressões para a área impermeável (s -impermeável); armazenamento em depressões para a área permeável (s -permeável) e Largura de drenagem (W).

3.5.3 Trabalhos com aplicação do SWMM

Os procedimentos de modelagem hidrológica aplicando o SWMM vêm se desenvolvendo ao longo dos anos. Alguns estudos considerando eventos de inundação utilizando o SWMM estão descritos a seguir.

A pesquisa realizada por Camorani, Castellarin e Brath (2005) descreveu os efeitos de inundações decorrentes de mudanças do uso da terra. O estudo foi realizado em Bologna, Itália, onde foi modelado o comportamento da concentração do escoamento em uma área de aproximadamente 76,1 km². Informações de uso do solo dos anos de 1955, 1980 e 1992 foram utilizados, criando três cenários. O modelo chuva-vazão utilizando o SWMM foi aplicado de forma a verificar o comportamento hidrológico e hidráulico da região em estudo,

considerando diversos eventos de precipitação relacionados a distintos períodos de recorrência. As conclusões desse trabalho apontam que os eventos de inundações estão cada vez mais frequentes, e esse fenômeno está diretamente ligado às formas de uso da terra, como também precipitações com pequenas durações e elevada intensidade estão causando inundações cada vez mais intensas.

Uma bacia hidrográfica, *Ballona Creek*, localizada na região sul da Califórnia, caracterizada por uma grande extensão de 217 km², foi objeto de estudo em uma pesquisa que utilizou o *Storm Water Management Model* (SWMM), calibrando e criando algumas modificações com base em um sistema de informação geográfica, de forma a processar dados de entrada e produzir a distribuição espacial da precipitação. Um processo de otimização foi aplicando, considerando-se dez eventos de chuva. Após a geração dos resultados observados, o modelo calibrado obteve uma precisão aceitável. Na análise de sensibilidade, os parâmetros com maior sensibilidade foram o armazenamento em depressões para área impermeável e a porcentagem de área impermeável, e o menos sensível foi a rugosidade de Manning dos condutos, na formação do escoamento superficial (BARCO, WONG e MICHAEL, 2008).

A bacia hidrográfica de *Sazlıdere*, localizada na Turquia, com uma área de drenagem de 165 km², vem sendo cenário de um aumento populacional, onde são registrados eventos de inundações. Com intuito de analisar esses impactos, o escoamento foi estimado utilizando o modelo SWMM. A simulação ocorreu para eventos de inundações típicos e extremos. Os resultados apontaram que mesmo para tempestades típicas, as inundações são recorrentes na bacia (GÜLBAZ e KAZEZYILMAZ-ALHAN, 2013).

Xu e Zhao (2016) realizaram um trabalho em *Dahongmen*, China, em uma área de 131 km², com intuito de monitorar os impactos do uso da terra nos processos hidrológicos. Para realização da pesquisa foram levadas em consideração, a elevação da área impermeável, as alterações de morfologia da rede do rio e a estrutura do sistema de drenagem. O modelo SWMM foi utilizado de forma a considerar distintos cenários urbanizados e perturbações antropogênicas. Imagens *Landsat TM*, foram aplicadas de forma a investigar os processos de urbanização com base no índice *Urban Land-use Index*. De forma a analisar as modificações das características da enchente em diferentes cenários urbanizados, foi utilizada a precipitação considerando diversos períodos de retorno. Os resultados indicaram que o modelo aplicado foi bem ajustado para diversas tempestades em cenários urbanos diversos.

O estudo de Li *et al.* (2016), realizado na cidade de *Shenyang*, China, contempla uma área de 0,242 km² em uma bacia urbanizada. O *Storm Water Management Model* foi aplicado na simulação da quantidade e qualidade do escoamento. Informações de três eventos de precipitação foram computadas e utilizadas na calibração e validação dos parâmetros do modelo. A análise de desempenho do modelo foi realizada por meio do coeficiente de *Nash* e *Sutcliffe*, erro relativo e coeficiente de determinação. Para realização de análise de sensibilidade foi utilizado o método de triagem de *Morris*. De forma geral, a calibração e validação evidenciaram que a estrutura e os parâmetros do modelo tiveram um bom ajuste em relação à simulação do escoamento.

O trabalho feito por Guan, Sillanpää e Koivusalo (2015) foi realizado em *Espoo*, na Finlândia, em uma área de aproximadamente 0,123 km². Ele teve como foco explorar e avaliar as mudanças hidrológicas graduais decorrentes do crescimento urbano em uma zona rural para uma bacia de densidade média e residencial. O modelo aplicado foi o SWMM, simulando diversos cenários em uma bacia urbana em processo de desenvolvimento. Informações meteorológicas sub-horárias foram utilizadas para calibrar e validar os parâmetros do modelo na bacia. Dessa maneira, o modelo foi aplicado a diversos cenários de desenvolvimento e gestão do escoamento. De posse dos resultados das simulações e observações, três problemas principais foram abordados: (1) como a hidrologia da bacia se modifica com as alterações na superfície da terra, (2) a forma como o desenvolvimento urbano modifica os fluxos de pré-desenvolvimento e (3) como as técnicas de gestão de águas pluviais influenciam a hidrologia da bacia.

Lima (2019) realizou um trabalho na bacia do ribeirão Arrudas em Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. A extensão da área da bacia é de 38,0 km². O modelo SWMM foi empregado com intuito de validar um modelo hidrodinâmico para bacia em estudo, com a simulação de eventos extremos de precipitação. O autor concluiu que o SWMM é eficiente para simulações hidrológicas, porém é necessário um refinamento grande das informações de entrada para construção do modelo, o que acaba dificultando a sua utilização em muitos casos, principalmente em bacias urbanas.

O Quadro 3.3 tem o intuito de demonstrar pesquisas, inclusive as citadas acima, que também utilizaram o SWMM na modelagem hidrológica, de forma a enfatizar a extensão de aplicação do modelo, apresentando o nome dos autores das obras, os respectivos anos de publicação dos

documentos, o local de realização do trabalho, área da bacia em km², o uso e ocupação do solo da bacia, podendo ser urbano ou rural, método de infiltração (Número da Curva, Horton e Green-Ampt), tipo de calibração, sendo manual ou automática e tipo de simulação (por evento ou contínua).

Quadro 3.3 - Trabalhos de modelagem aplicando o SWMM e suas principais características

Autores	Local	Área (km²)	Ocupação	Método de Infiltração	Tipo de calibração	Tipo de Simulação
Liong, Chan e Shreeram (2002)	Upper Bukit Timah (UBT), Singapore divisa com a Malásia e a Indonésia	6,11	Urbana	Horton	Automática	Por evento
Camorani, Castellarin e Brath (2005)	Rio Po em Bologna, Itália	76,1	Urbana	Número da Curva	Manual	Por evento
Barco, Wong e Michael (2008)	Ballona Creek, EUA	217	Urbana	Horton	Automática	Por evento
Gülbaz e Kazezyilmaz-Alhan (2013)	Sazlıdere, Turkey	165	Rural	Green-Ampt	Manual	Por evento
Krebs <i>et al.</i> (2013)	Taapelipilki, Finlândia	0,0587	Urbana	Green-Ampt	Automática	Por evento
Krebs <i>et al.</i> (2014)	Laht, Finlândia	*0,06-0,12	Urbana	Green-Ampt	Automática	Por evento
Huanget <i>al.</i> (2015)	Taipei, China	20,29	Urbana	Horton	Automática	Por evento
Guan, Sillanpää e Koivusalo (2015)	Espoo, Finland	0,123	Rural	Green-Ampt	Manual	Por evento
Baek <i>et al.</i> (2015)	Gwangju Coreia do Sul	0,0125	Urbana	Green-Ampt	Automática	Por evento
Xu e Zhao (2016)	Dahongmen, China	131	Urbana	Horton	Automática	Contínuo
Faria, Barbassa e Silveira (2013)	Córrego Barbado, Mato Grosso	10,71	Urbana	Horton	Manual	Por evento
Liet <i>al.</i> , 2016	Shenyang, China	0,242	Urbana	Horton	Manual	Por evento
Masseroni e Cislighi (2016)	Seveso, Itália	2500	Urbana	Horton	Automática	Contínuo
Gülbaz <i>et al.</i> , (2018)	Rio Ayamama, Istanbul	74	Urbana	Horton	Manual	Por evento
Lima (2019)	Ribeirão Arrudas, Minas Gerais	38	Urbana	Número da Curva	Automática	Por evento

*Bacias com áreas que variam entre o intervalo estipulado

Todas as pesquisas demonstradas no Quadro 3.4 aplicaram o SWMM na modelagem hidrológica de eventos de inundações e tiveram resultados satisfatórios.

3.6 Análise de sensibilidade

A verificação da sensibilidade do modelo é um método utilizado para encontrar os parâmetros ou entradas, que possuem maior sensibilidade nos resultados, de forma a definir os parâmetros mais sensíveis que devem ser calibrados posteriormente.

As soluções encontradas por meio da análise de sensibilidade podem ser importantes na avaliação das incertezas relacionadas aos parâmetros, que devem ser utilizados no ajuste fino da calibração. Inicialmente todos os parâmetros devem ser verificados, para posterior identificação daqueles mais sensíveis, de forma a proporcionar uma simulação mais precisa (NIAZI *et al.*, 2017 e ZAGHLOUL, 1983). A seguir, estão descritos os trabalhos que realizaram a análise de sensibilidade e identificaram os parâmetros mais sensíveis no SWMM.

Em uma bacia hidrográfica do Arroio Cancela, na região de Santa Maria, Rio Grande do Sul, foi feita uma pesquisa cujo foco foi a realização da calibração dos parâmetros do modelo hidrológico *Storm Water Management Model* (SWMM), por meio do algoritmo multiobjetivo *Evolutionary Reference Point Based Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm*. Nessa análise foi considerado um percentual de variação de +5% e -5% sobre os valores de cada parâmetro. Na realização da análise de sensibilidade, o modelo considerou as seguintes funções objetivo: coeficiente de eficiência de *Nash* e *Sutcliffe*; erro percentual do pico de vazão e erro percentual do volume escoado. Os parâmetros de maior sensibilidade foram a área impermeável, coeficiente de escoamento de Manning, largura de escoamento e inclinação da bacia (FORMIGA *et al.*, 2016).

Beling, Paiva e Paiva (2013) realizaram um estudo na bacia hidrográfica do Arroio Cancela, localizada na região urbana de Santa Maria, estado do Rio Grande do Sul, utilizando o modelo SWMM para realizar uma análise da sensibilidade dos parâmetros, onde foi fornecido um incremento de 10% sobre o valor dos mesmos. O artigo considerou as alterações dos parâmetros do modelo com base em 4 funções objetivo: eficiência de *Nash* e *Sutcliffe*, desvios

ponderados ao quadrado, vazão de pico e volume total escoado. Conforme a análise realizada, o parâmetro mais sensível foi o percentual de área impermeável da bacia.

Na pesquisa realizada pelos autores Faria, Barbassa e Silveira (2016), aplicada na bacia do Córrego Barbado, na cidade de Cuiabá-MT, a análise de sensibilidade foi verificada através da comparação gráfica dos hidrogramas resultantes, sendo que a cada parâmetro foram acrescentadas porcentagens de +90% e -90%. O parâmetro mais sensível foi porcentagem de área impermeável, sendo, portanto, importante na obtenção de valores mais próximos da realidade. Em contrapartida, os parâmetros com menor sensibilidade foram armazenamento em áreas permeáveis, coeficiente de Manning para áreas impermeáveis e armazenamento em depressão de áreas impermeáveis.

3.7 Calibração e validação dos parâmetros do modelo

Na execução de simulações em bacias hidrográficas, aplicam-se os procedimentos de calibração e validação, que têm por objetivo encontrar os melhores valores dos parâmetros do modelo utilizado.

A adequação dos parâmetros de um modelo hidrológico é uma fase na qual o usuário deve se esforçar, de forma a obter uma representação mais adequada do evento real. Na determinação dos parâmetros, alguns podem ser estimados com base em características físicas, outros conforme os dados observados das variáveis de entrada e saída. Em bacias com um grande número de subdivisões, devido ao elevado número de parâmetros deve ser considerado apenas aquele conjunto que for mais sensível (COLLISCHONN e TUCCI, 1998 e TUCCI, 2005).

De forma matemática, a calibração pode ser descrita como sendo um problema de diversas soluções com possibilidades iguais, onde o número de equações é maior que o de incógnitas, sendo possível gerar soluções que estão de acordo com as equações propostas, porém não são representativas na descrição lógica do problema, assim como os valores encontrados para os parâmetros (COLLISCHONN e TUCCI, 1998).

A calibração é concebida alterando os valores dos parâmetros até que o hidrograma calculado possa gerar o hidrograma observado com boa precisão (COLLISCHONN e TUCCI, 1998).

O procedimento de validação dos parâmetros trata-se de um processo de verificação dos resultados do modelo, onde são selecionados eventos diferentes dos definidos na calibração dos parâmetros, de forma a verificar se os parâmetros escolhidos representam o comportamento da bacia de maneira aceitável (SIQUEIRA, 2017).

Existem duas formas de calibrar os parâmetros do modelo: por meio do método de tentativa e erro, ou seja, a calibração manual (ver item 3.7.1) e a calibração automática (ver item 3.7.2), realizada por meio de procedimentos de otimização. Exemplos de trabalhos de modelagem hidrológica utilizando o SWMM, adotando métodos de calibração manual e automática podem ser vistos no Quadro 3.3.

3.7.1 Calibração por tentativa e erro

O método de tentativa e erro foi a primeira técnica desenvolvida pelos hidrólogos para encontrar os valores dos parâmetros, devido a sua robustez e simplicidade. O ajuste da calibração manual é realizado por meio de tentativa e erro. Em cada análise é observado o ajuste de vazões mínimas, o formato do hidrograma gerado, a adequação do pico de cheias em relação a valores máximos, volume, forma e tempo de ocorrência. Dessa forma, a calibração manual pode até ser realizada de forma rápida e considerando diversos objetivos de forma implícita, porém depende muito da habilidade do usuário (COLLISCHONN e TUCCI, 1998).

A calibração do SWMM pode ser realizada de forma manual, modificando um parâmetro por vez, comparando os valores observados com os estimados do SWMM. Inicialmente os parâmetros que são mais sensíveis são selecionados. Após, são estipulados valores iniciais, com base em um manual ou na literatura. Posteriormente, ajustes são realizados se necessário. Esse procedimento pode ser muito extenso, principalmente quando um número grande de parâmetros são considerados (NIAZI *et al.*, 2017).

O procedimento de tentativa e erro engloba um certo grau de subjetividade no ajuste dos parâmetros. O Quadro 3.4 relata as vantagens e desvantagens dessa aplicação, segundo Tucci (2005).

Quadro 3.4 - Vantagens e desvantagens do método de tentativa e erro

Vantagens	Desvantagens
O conhecimento do analista pode ser inserido na avaliação da bacia, conforme suas características e comportamento.	Elevado custo de aplicação, pois demanda um maior tempo de execução por parte de equipes qualificadas.
Propicia a constatação de erros grosseiros e aprofundados nas diversas avaliações da saída e entrada do modelo.	Subjetividade da calibração, que varia conforme o usuário. Diversas vezes um modelo pode ser classificado como inadequado para uma certa região por causa da inabilidade do profissional em ajustá-lo ou utilizá-lo na bacia.
Melhor compreensão por parte do usuário de todo o sistema.	

Fonte: Adaptado de TUCCI, 2005.

3.7.2 Calibração automática

O ajuste automático é concebido por processos de otimização por meio de técnicas iterativas, que contemplam as seguintes limitações: soluções contendo mínimos locais; resoluções matemáticas com parâmetros longe de uma realidade física; restrições das funções objetivos; entre outros fatores. É de extrema relevância que o analista conheça as restrições dos métodos de calibração automática, sendo que o uso incorreto dessa técnica pode acarretar em um risco de uso das informações produzidas por tais modelos (COLLISCHONN e TUCCI, 1998).

Conforme Tucci (2005), a técnica de calibração automática sugere otimizar matematicamente a função objetivo. O Quadro 3.5 mostra as vantagens e desvantagens da técnica automática de calibração dos parâmetros.

Quadro 3.5 - Desvantagens e vantagens do procedimento automático de calibração parâmetros

Desvantagens	Vantagens
Os dados de entrada provenientes da otimização da vazão e da precipitação podem gerar erros de difícil detecção, resultando em soluções incorretas.	Procedimento com melhor custo de operação, pois demanda um tempo menor de execução se comparado ao processo manual.
Quando os modelos de precipitação-vazão, na estrutura dos seus algoritmos, contemplam funções descontínuas caracterizadas por valores específicos.	Maior agilidade na execução.
A função objetivo nem sempre retrata a melhor solução dentro de limitações de dados e do modelo.	Maior variação do grupo de possibilidades de resultados dos parâmetros.

Fonte: Adaptado de TUCCI, 2005.

Algumas funções objetivo utilizadas no processo de calibração dos parâmetros dos modelos são representadas conforme as equações a seguir: relação entre os volumes calculados e observados (Equação 1.2); o erro padrão (Equação 3.3); o coeficiente de *Nash* e *Sutcliffe* (Equação 3.4); e o erro padrão do inverso da vazão (Equação 3.5) (COLLISCHONN e TUCCI, 1998).

$$\Delta V = \frac{\Sigma(W_{cal(t)}) - \Sigma(W_{obs(t)})}{\Sigma(W_{obs(t)})} \quad (3.2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\Sigma(W_{obs(t)} - W_{cal(t)})^2}{nt}} \quad (3.3)$$

$$COE = 1 - \frac{\Sigma(W_{obs(t)} - W_{cal(t)})^2}{\Sigma(W_{obs(t)} - W_m)^2} \quad (3.4)$$

$$RMSEI = \sqrt{\frac{\Sigma\left(\frac{1}{W_{obs(t)}} - \frac{1}{W_{cal(t)}}\right)^2}{nt}} \quad (3.5)$$

Onde:

$W_{obs(t)}$ = trata-se da variável observada no tempo t ;

$W_{cal(t)}$ = representa a variável calculada no tempo t ;

nt = é o número de intervalos de tempo;

W_m = é a variável média.

Entre tantos métodos de calibração automática existentes, destaca-se aqui uma técnica de calibração automática denominada *Dynamically Dimensioned Search* (DDS) desenvolvida por Tolson e Shoemaker (2007). O intuito de desenvolvimento desse método de busca estocástico foi encontrar uma solução global ótima com um limite de avaliação do modelo. Sendo assim, o algoritmo foi criado para "buscar" a função ótima, tendo apenas um critério de parada que seria o número de avaliações (LIMA, 2019 e VENTURA, 2018).

3.8 Padrões espaço temporais da chuva

Os padrões espaço temporais da chuva são importantes para verificar o comportamento da bacia quando submetida a precipitação em diferentes direções, contribuindo para os estudos de inundações em bacias urbanas. Um desses padrões é a definição do ângulo de deslocamento da chuva.

Existem diversas pesquisas que abordaram a determinação do ângulo de deslocamento da tormenta, sendo uma das mais antigas encontradas a desenvolvida por Diskin (1987), que será mais detalhada nesse trabalho, por ser um método consolidado na literatura, sendo muito utilizado e de fácil reprodução. Outras abordagens que também trabalharam com a definição do ângulo de deslocamento da chuva foram Carbone *et al.* (2014) e Sigaroodi e Chen (2016).

Existem eventos de tempestade que formam diversos núcleos de chuva, sendo difícil a definição de uma única direção que represente todo o evento. Segundo Diskin (1987), um critério básico, comum a diversos métodos, é que as soluções levem a valores únicos da direção do movimento da precipitação para cada evento de tempestade. Sendo assim, as mudanças de direção no decorrer do tempo na rede de monitoramento são ignoradas.

Em cada estação de monitoramento da chuva são formados hietogramas distintos para um dado evento. Portanto, é necessário selecionar um recurso para determinar a hora de chegada da chuva nos vários pluviômetros, para posterior definição do ângulo de deslocamento da chuva. O mais natural é o tempo do início das chuvas, mas outros métodos podem ser aplicados e geralmente são preferidos, como o tempo de maior intensidade de precipitação, o tempo em que uma porcentagem especificada da precipitação total é obtida, o tempo do centróide do hietograma, entre outras (DISKIN, 1987).

De acordo com Carbone *et al.* (2014) a definição do tempo de chegada da chuva em cada estação de monitoramento, onde são formados hietogramas distintos de chuva é uma tarefa complexa. Consequentemente, no trabalho realizado por esses autores, foram consideradas três características diferentes para verificar o tempo de chegada da chuva nas estações: o tempo do centróide do hietograma, o tempo de maior intensidade de precipitação e o horário de início da precipitação.

Os resultados apontaram que considerar o tempo de início da precipitação era a pior característica, pois favorecia o horário de chegada incorreto das tempestades na maioria das estações. Já o recurso do centróide forneceu a melhor aproximação de direção do evento (CARBONE *et al.* 2014). Na pesquisa realizada por Sigaroodi e Chen (2016) o tempo de chegada da chuva na estação também foi definido utilizando o centróide do hietograma.

Para o cálculo do tempo do centróide (T), do evento para cada estação considera-se apenas as estações com dados de chuva. Para cada estação, em cada intervalo de tempo multiplica-se o tempo correspondente pela precipitação, e ao final do evento soma-se esses valores e divide-se pela precipitação total da estação (Equação 3.6) (DISKIN, 1987).

$$T = \frac{\sum(t \times p)}{\sum p} \quad (3.6)$$

Onde:

t = intervalo de tempo (h)

p = precipitação na estação para cada intervalo de tempo (mm)

A direção de deslocamento do evento de chuva pode ser definida como sendo uma solução geométrica, com a definição da equação do plano inclinado utilizando as coordenadas da estação e o tempo de chegada da chuva em um dado pluviômetro. A direção do movimento da tempestade é definida como sendo a paralela da inclinação máxima do plano, ou seja, a determinação da equação do plano inclinado que melhor se ajusta a um determinado conjunto de pontos no espaço (DISKIN, 1987).

Adiante, para implementação da metodologia proposta por Diskin (1987), as coordenadas de cada ponto são a localização da estação, relativa a um par x, y e o tempo de chegada da chuva na estação (T) foi considerado o tempo do centróide dos hietogramas (o autor não discutiu os critérios de escolha do tempo de chegada da chuva na estação). O critério para o melhor ajuste foi fundamentado na minimização da soma dos desvios quadrados entre os valores previstos pela equação do plano inclinado e os tempos observados registrados. Sendo a, b e c os valores dos parâmetros que minimizam essa soma (Equação 3.7).

$$w = s((T - ax - by - c)^2) \quad (3.7)$$

Onde:

w = o somatório dos desvios quadrados;

$s()$ = denota a operação de somatório representando todas estações para um dado evento de chuva;

T = tempo do centróide do hietograma de chuva da estação;

a, b e c = são os parâmetros da equação;

x e y = coordenadas das estações.

Para encontrar o valor dos três parâmetros a, b e c que minimizam a soma dos desvios quadrados, inicialmente deve ser resolvido o conjunto de três equações simultâneas obtidas igualando a zero as derivadas parciais da Equação 3.7 em relação a esses parâmetros. As expressões resultantes podem ser verificadas por meio das Equações 3.8, 3.9 e 3.10 (DISKIN, 1987).

$$aS(x^2) + bS(xy) + cS(x) - S(Tx) = 0 \quad (3.8)$$

$$aS(xy) + bS(y^2) + cS(y) - S(Ty) = 0 \quad (3.9)$$

$$aS(x) + bS(y) + cN - S(T) = 0 \quad (3.10)$$

Onde:

N = número de estações com dados.

A seguir, os parâmetros a, b e c são isolados e assim encontrados por meio das Equações 3.11, 3.12 e 3.13 (DISKIN, 1987).

$$a = \frac{(AE-BC)}{DE-C^2} \quad (3.11)$$

$$b = \frac{(BD-AC)}{(DE-C^2)} \quad (3.12)$$

$$c = \frac{[S(T) - aS(x) - bS(y)]}{N} \quad (3.13)$$

Onde:

A, B, C, D e E = constantes

Dessa maneira, as constantes A, B, C, D, e E são definitas pelas Equações 3.14 a 3.18 (DISKIN, 1987).

$$A = NS(Tx) - S(T)S(x) \quad (3.14)$$

$$B = NS(Ty) - S(T)S(y) \quad (3.15)$$

$$C = NS(xy) - S(x)S(y) \quad (3.16)$$

$$D = NS(x^2) - S(x)S(x) \quad (3.17)$$

$$E = NS(y^2) - S(y)S(y) \quad (3.18)$$

Para determinação do ângulo do evento, aplica-se a Equação 3.19, onde a e b são os parâmetros definidos pelas Equações 3.11 e 3.12 (DISKIN, 1987).

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{b}{a} \quad (3.19)$$

Onde:

θ = ângulo do evento, em graus

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse item é descrita a metodologia da pesquisa que foi realizada. O primeiro item 4.1, área de estudo, inicia com a definição da área de estudo, descreve algumas características relacionadas à bacia do Córrego Cachoeirinha e exemplos de inundações ocorridas na região. O item 4.2, eventos e modelo, é iniciado com uma descrição da fonte dos dados de entrada e período da série de análise. Em seguida, são apresentados os procedimentos utilizados para selecionar os eventos que geraram alertas a serem considerados na pesquisa e, por último, a definição do modelo utilizado com a sub-divisão da bacia do Cachoeirinha. O item 4.3, descrição espacial e temporal da precipitação e construção dos hietogramas de chuva, explica como foram feitos os mapas de chuva dos eventos e definidos os hietogramas de chuva. O item 4.4, modelagem no *Storm Water Management Model (SWMM)*, primeiramente foi feita a verificação das opções de simulação que foram adotadas no modelo, adiante são mostrados os procedimentos de análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros do modelo. Na sequência, são apresentados os procedimentos de simulações dos eventos observados e sintéticos. O item 4.5, precipitação concentrada e distribuída, é descrito como foram feitas as simulações de utilização da chuva considerada de forma distribuída e concentrada. A Figura 4.1 representa um fluxograma das etapas do trabalho relacionadas aos respectivos objetivos definidos nesse estudo.

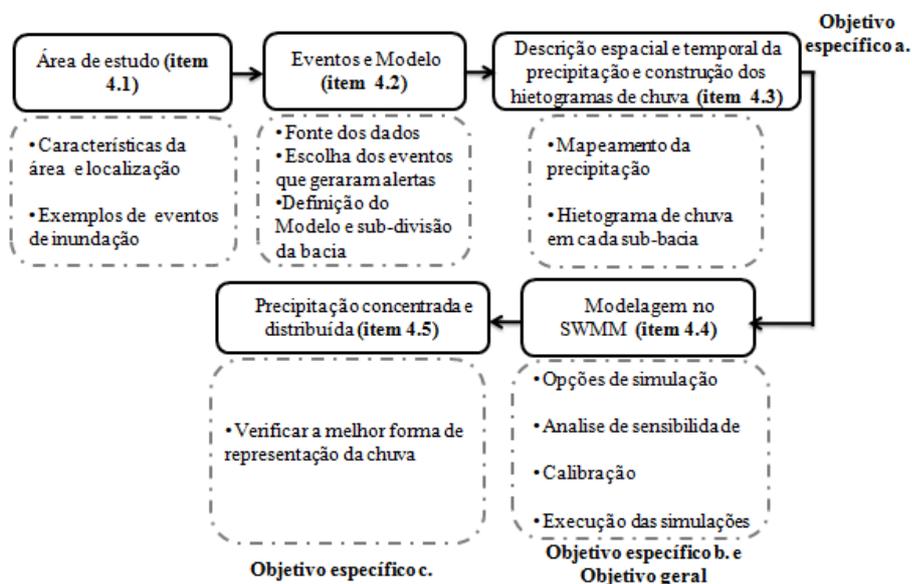


Figura 4.1 - Fluxograma de representação das etapas metodológicas e indicação dos objetivos propostos

4.1 Área de estudo

O item 4.1.1, caracterização e localização da área de estudo, descreve informações sobre a área de estudo, demonstrando a localização da bacia do Córrego Cachoeirinha na cidade de Belo Horizonte, em Minas Gerais, e a rede hidrográfica da bacia. O item 4.1.2, exemplos de eventos que causaram inundações, apresenta um histórico de imagens de eventos de inundações que ocorreram na região de estudo.

4.1.1 Caracterização da área de estudo e localização

A área de estudo escolhida foi a bacia do Córrego Cachoeirinha que está localizada na região nordeste da cidade de Belo Horizonte, em Minas Gerais. Essa região vem sendo cenário de frequentes inundações, onde observa-se uma grande vulnerabilidade do sistema de drenagem (PBH, 2016). O Córrego Cachoeirinha ao se encontrar com o Ribeirão Pampulha forma o Ribeirão da Onça, que é afluente do Rio das Velhas (SIQUEIRA, MOURA e SILVA, 2019). O Quadro 4.1 representa algumas características do Córrego Cachoeirinha.

Quadro 4.1 - Características da bacia do Córrego Cachoeirinha

Definição	Dados	Unidade
Extensão total do talvegue	7.790	m
Extensão do curso d'água principal	7.012	m
Diferença de valores de cota entre o ponto mais a montante e o exutório da bacia	149	m
Declividade média total da bacia	0,0191	m/m
Área total da bacia elementar	15,79	km ²

Fonte: Adaptado de PBH (2000).

A bacia que compõe o Córrego Cachoeirinha apresenta o uso e ocupação do solo quase todo consolidado, composto por comércios, residências, fábricas e baixo percentual de área verde. Devido à ocorrência dos diversos registros de inundações em sua avenida sanitária, nas margens do curso d'água, foi implantada dentro do Córrego Cachoeirinha a estação 13, integrante do Programa de Monitoramento Hidrológico de Belo Horizonte. Nas proximidades da região também é possível observar as estações 8, 10, 11, 12 e 14 (Figura 4.2).

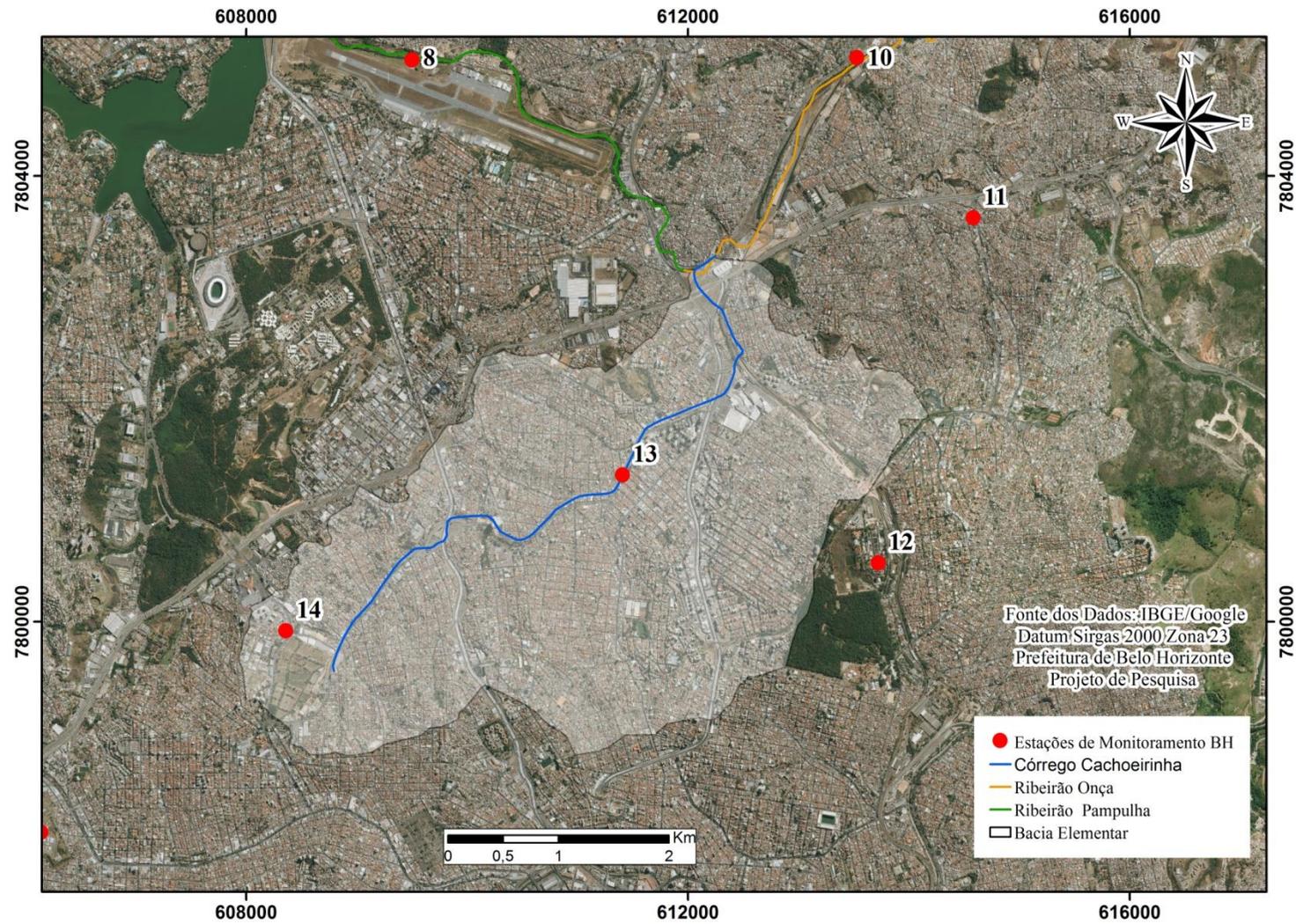


Figura 4.2 - Representação da bacia do Córrego Cachoeirinha

4.1.2 Exemplos de eventos que causaram inundação

Nas Figuras 4.4 e 4.5, respectivamente, são mostrados registros de eventos de inundações com transbordamento do canal que ocorreram no Córrego Cachoeirinha, na Avenida Bernardo de Vasconcelos.



Figura 4.4 - Histórico de transbordamento do Córrego Cachoeirinha em 2011, 2012 e 2013
Fonte: G1 MINAS - BELO HORIZONTE, 2013.



Figura 4.5 - Inundação no Córrego Cachoeirinha em 2019
Fonte: JORNAL O TEMPO, 2019.

A Figura 4.5 representa um evento de precipitação extrema que ocorreu no dia 17/02/2019, onde pode ser observado o transbordamento do canal. Nas imagens 4.4 e 4.5 é possível observar que problemas de inundação nessa região vem ocorrendo há algum tempo, sendo portanto necessárias medidas mitigadoras para resolução desse problema.

4.2 Fonte dos dados, seleção dos eventos e definição do modelo

No item 4.2.1, fonte dos dados de entrada do modelo, será apresentado quem disponibilizou os dados de entrada e o intervalo da série analisada. O item 4.2.2, seleção dos eventos utilizados na pesquisa que geraram alertas e definição dos grupos de eventos observados utilizados em

cada etapa metodológica, serão descritos os métodos utilizados para selecionar os eventos que geraram alertas na série de dados, posteriormente, a quantidade de eventos observados utilizados em cada etapa da pesquisa. Por fim, no item 4.2.3, definição do modelo hidrológico e subdivisão da bacia hidrográfica do Córrego do Cachoeirinha, descreve qual modelo foi selecionado para execução da pesquisa e como foi considerada a sub-divisão da bacia em estudo.

4.2.1 Fonte dos dados de entrada do modelo

Os dados de chuva e as coordenadas geográficas das 42 estações foram obtidos por meio do Programa de Monitoramento Hidrológico de Belo Horizonte, no intervalo compreendido entre setembro de 2011 até maio de 2019. A série de dados disponibilizada foi utilizada sem o preenchimento de falhas.

4.2.2 Seleção dos eventos utilizados na pesquisa que geraram alertas e definição dos grupos de eventos observados utilizados em cada etapa metodológica

Para essa pesquisa a classificação dos eventos que emitiram alertas na bacia foi feita com base em dados de nível d'água da estação 13, por ser a única estação fluviométrica, presente no Córrego Cachoeirinha. Segundo Siqueira (2017), a estação 13 é constituída por um pluviômetro de modelo TB4 da *Tipping Bucket Rain gauge* com sensor de nível ultrassônico, Easy TREK da Nivelco. A estação 13, além de dados de nível d'água também faz registro de dados de precipitação.

As informações registradas pela estação são armazenadas por meio de um data Logger e transferidas via sinal *General Packet Radio Service* (GPRS) a dois computadores que estão localizados na Empresa de Informática e Informação do município de Belo Horizonte - Prodabel (SIQUEIRA, 2017).

A frequência de transmissão registrada é de 10 em 10 minutos, totalizando, em 24 horas, um total de 144 dados (SIQUEIRA, 2017). Na pesquisa realizada por Silvestro *et al.* (2016) em uma área de aproximadamente 98 km² foi utilizada uma discretização temporal da precipitação de 10 minutos, para estimar a variabilidade temporal da chuva, na simulação do escoamento superficial de eventos de elevada magnitude. Diante dos fatos apresentados, a discretização

temporal considerada nessa pesquisa foi de 10 minutos. Na Figura 4.6, é mostrada a estação 13, localizada na bacia do Córrego Cachoeirinha, na Avenida Bernardo de Vasconcelos.



Figura 4.6 - Estação 13, localizada na Avenida Bernardo Vasconcelos, no Córrego Cachoeirinha

Fonte: SIQUEIRA, 2017.

Dessa forma, inicialmente foram analisados os eventos que emitiram alertas, ou seja, cenários de chuvas intensas que ocasionam a elevação do nível d'água, com valores maiores ou iguais a 210 cm, altura mínima para que seja emitido algum tipo de alerta na bacia do Cachoeirinha (PBH, 2011 *apud* SIQUEIRA, 2017). O Quadro 4.2 mostra, a classificação dos alertas, com as porcentagens de representação, com relação à altura do nível no canal, e a respectiva descrição.

Quadro 4.2 - Tipo de alerta e porcentagens dos níveis de alerta, das estações fluviométricas

Tipo de alerta	Porcentagem	Descrição
Amarelo	50%	Porcentagem sobre a altura do canal fechado ou da restrição, no canal aberto.
Laranja	80%	Porcentagem sobre a altura do canal fechado ou da restrição, no canal aberto.
Vermelho	100%	Extravasamento do canal.

Fonte: Adaptado de PBH, 2016.

De acordo com Siqueira, Moura e Silva (2019), para gerar o alerta amarelo no córrego Cachoeirinha, o nível d'água deve ser maior ou igual 210 cm, para valores maiores ou iguais a 336 cm será emitido o alerta laranja e, por fim, para uma altura maior ou igual 580 cm o alerta será vermelho. A Figura 4.7 demonstra os níveis de alerta no canal.

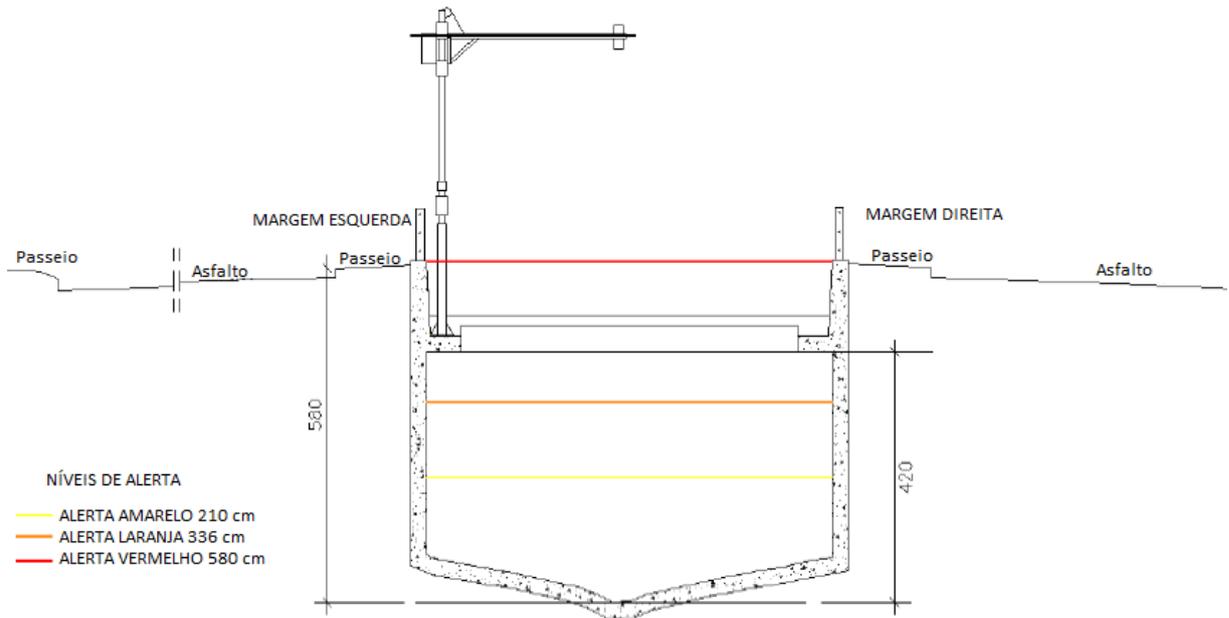


Figura 4.7 - Canal com a indicação dos níveis de alerta (Estação 13), na Avenida Bernardo de Vasconcelos

Fonte: PBH, 2011 *apud* SIQUEIRA, 2017.

Com os dados disponíveis em uma planilha, considerando apenas informações de nível d'água da estação 13, foram feitas verificações de quais eventos emitiram alertas. Posteriormente, foi feita uma análise gráfica de todos os eventos que emitiram alertas, profundidade *versus* tempo de duração do evento, linigrama, e a precipitação *versus* tempo de duração do evento, hietograma, verificando também o evento anterior e posterior, do dia de formação do alerta.

Como premissas para escolha dos eventos que emitiram alertas utilizados nas análises, foram adotados os seguintes critérios: (i) não foram considerados eventos que emitiram alerta amarelo e apresentavam falhas na ascensão do linigrama. A eliminação de alguns eventos com alertas amarelos foi devido ao grande número de eventos com essa classificação detectados na série de dados. Já as falhas na ascensão podem prejudicar a emissão correta do alerta; e (ii) observaram-se também eventos que emitiram falsos alertas, em dias sem a presença de chuva.

Após os critérios adotados anteriormente, para um mesmo evento, quando o nível d' água era elevado e gerava um alerta, e após reduzia a ponto de retornar valores próximos aos níveis observados no início do evento, e, em seguida, aumentava e gerava um novo alerta, era então considerado que naquele mesmo dia ocorreram dois alertas distintos e o mesmo evento foi então dividido.

O Quadro 4.3 tem por objetivo demonstrar que foram utilizados grupos de eventos observados distintos nas etapas metodológicas posteriores. Após considerar os critérios de seleção dos eventos mencionados anteriormente, na etapa de descrição espacial e temporal da precipitação e construção dos hietogramas de chuva foram utilizados todos os 56 eventos que geraram alertas e podiam ser utilizados na pesquisa. Porém, esse grupo de eventos que geraram alertas selecionados na série de dados era extenso, houve então a necessidade de redução dos eventos para realização das etapas seguintes, de forma a simplificar e diminuir o tempo de processamento dos eventos nos procedimentos de modelagem.

Foram estão considerados dois grupos distintos dos eventos observados, para execução das próximas etapas. Na análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros do modelo foi selecionado um grupo de eventos (28 eventos que geraram alertas). Já nas etapas de simulações a serem analisadas na pesquisa e na modelagem da chuva concentrada e distribuída foi selecionado um outro grupo de eventos (20 eventos observados) (Quadro 4.3).

Quadro 4.3 - Relação dos eventos observados utilizados em cada etapa metodológica

Etapas da pesquisa	Eventos observados selecionados
Discretização espacial e temporal da precipitação (ver item 4.3)	-47 eventos que emitiram alertas amarelos. -2 eventos que emitiram alertas laranjas. -7 eventos que emitiram alertas vermelhos. Total de 56 eventos.
Análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros do modelo (ver itens 4.4.2 e 4.4.3)	-26 eventos que emitiram alertas amarelos. -2 eventos que emitiram alertas laranjas. Total de 28 eventos.
Simulações a serem analisadas na pesquisa (ver item 4.4.4): -Eventos observados que emitiram alertas (Alertas simulados) -Eventos sintéticos criados nas diversas direções no espaço-tempo (Alertas sintéticos)	-13 eventos que emitiram alertas amarelos -1 evento que emitiu alerta laranja -3 eventos com alertas vermelhos -3 eventos que não emitiram alertas Total de 20 eventos.
Modelagem da chuva concentrada e distribuída (ver item 4.5)	

Nas etapas metodológicas posteriores, itens 4.3, 4.4 e 4.4.4 / 4.5, respectivamente, foram descritos os critérios de escolha dos eventos selecionados em cada etapa da pesquisa. O Quadro 4.3 contribuiu para melhor entendimento das etapas metodológicas na sequência. No item 5.1, relacionado aos resultados foram demonstrados quais são esses eventos mencionados no Quadro 4.3, explicando com detalhes.

4.2.3 Definição do modelo hidrológico com a subdivisão da bacia hidrográfica do Córrego do Cachoeirinha

Para realização dessa pesquisa, em conformidade com os objetivos desse trabalho, optou-se por utilizar o modelo SWMM, por ser bastante empregado na literatura em procedimentos de modelagem hidrológica, na simulação do escoamento superficial, conforme pode ser verificado no Quadro 3.3. Um outro fator relevante para escolha do modelo, foi que na região de estudo, Córrego Cachoeirinha, já existia a priori um modelo hidrológico pronto, para simulação do escoamento superficial montado no SWMM, feito na pesquisa de Siqueira, Moura e Silva (2019), com resultados satisfatórios.

Por conseguinte, o modelo hidrológico definido por Siqueira, Moura e Silva (2019), subdividiu a bacia do Cachoeirinha em 39 sub-bacias, considerando as características da região (por exemplo, uso do solo), incluindo o sistema de drenagem.

Porém, nesse trabalho de forma a simplificar o modelo para execução das simulações foram excluídas 4 sub-bacias, que tinham pouca influência na modelagem e estavam a jusante da sub-bacia 25 do modelo, onde fica localizada a estação 13, na qual foram utilizados os dados de nível para definição dos eventos que geraram alertas nessa pesquisa. Algumas sub-bacias a jusante da sub-bacia 25 foram mantidas, para que a modelagem hidrodinâmica possa ser melhor representada e qualquer efeito a jusante da sub-bacia 25 possa ser levado em conta.

A Figura 4.8 mostra a imagem da bacia do Córrego Cachoeirinha, no modelo SWMM, identificando as sub-bacias, a rede hidrográfica, nó do exutório, que representa o limite final a jusante do sistema de drenagem para onde o fluxo do escoamento é direcionado, na imagem o nó do exutório foi ampliado para melhor visualização, e o nó referente a estação 13.

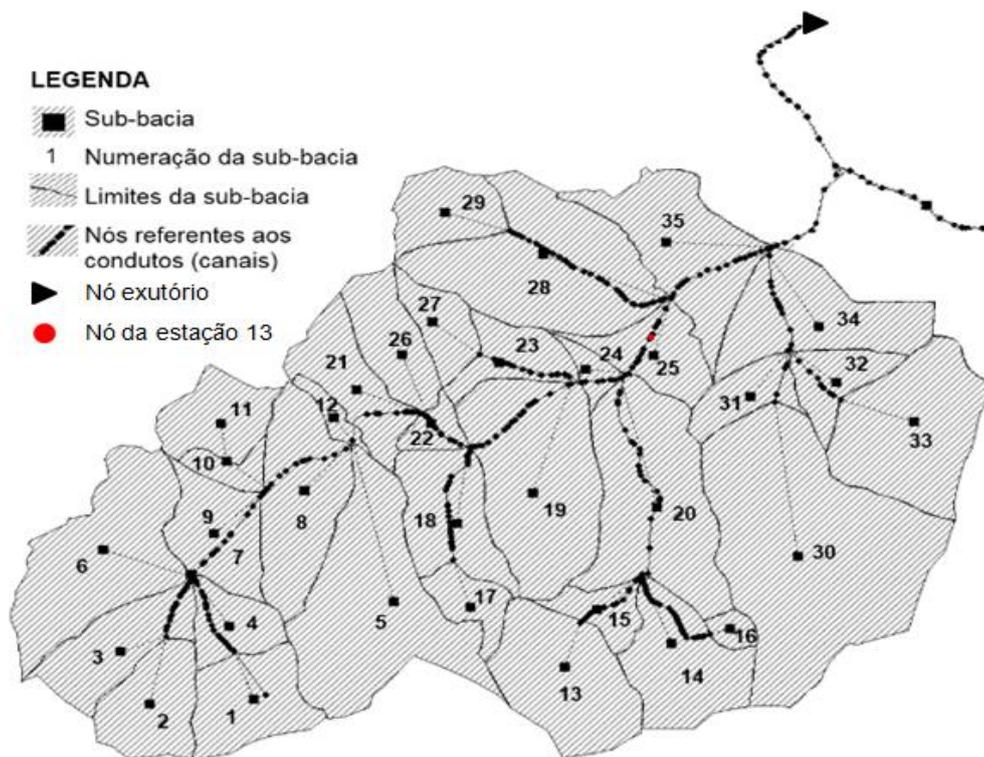


Figura 4.8 - Representação do modelo da bacia do Córrego Cachoeirinha montado no SWMM

Fonte: Adaptado de SIQUEIRA, MOURA e SILVA, 2019.

Portanto, conforme pode ser observado na Figura 4.8 a bacia do Córrego Cachoeirinha, montada no SWMM, para execução dessa pesquisa foi utilizada considerando 35 sub-bacias.

4.3 Descrição espacial e temporal da precipitação e construção dos hietogramas de chuva, para utilização na modelagem

Para todos os 56 eventos que geraram alertas selecionados para execução dessa pesquisa foram produzidos os mapas de precipitação e dimensionados os hietogramas de chuva em cada sub-bacia. A construção dos mapas de precipitação está relacionada ao primeiro objetivo específico: analisar eventos extremos de precipitação que geraram alertas na bacia do Cachoeirinha, de forma a identificar cenários com distribuição espaço-tempo variável.

Por conseguinte, foram produzidos mapas com base nos dados de precipitação e coordenadas geográficas em Universal Transversa de Mercator (UTM) das 42 estações de monitoramento de Belo Horizonte, para todos eventos selecionados que emitiram alerta. No Quadro 4.4, são apresentadas as coordenadas das estações utilizadas, seguindo a orientação Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas (SIRGAS) 2000.

Quadro 4.4 - Coordenadas geográficas das estações do monitoramento hidrológico de Belo Horizonte

ESTAÇÃO	LATITUDE - S		LONGITUDE - O			UTM		FUSO	
1	-19	48	12,4622	-43	59	23,2408	605808,1250	7809951,3360	23
2	-19	48	10,7570	-43	58	28,6691	607396,2860	7809994,2000	23
3	-19	47	16,5991	-43	57	19,1948	609428,0400	7811646,7570	23
4	-19	48	34,6961	-44	0	0,8044	604711,1200	7809274,3190	23
5	-19	48	56,7198	-43	58	32,4791	607276,8670	7808581,8810	23
6	-19	48	47,6082	-43	57	27,3413	609173,7360	7808850,4040	23
7	-19	49	25,2533	-43	57	23,1485	609288,5770	7807692,3580	23
8	-19	50	50,4849	-43	57	15,3970	609497,8620	7805070,7480	23
9	-19	49	17,6615	-43	53	43,4144	615682,8690	7807885,1040	23
10	-19	50	49,0260	-43	54	56,9236	613526,1770	7805090,1770	23
11	-19	51	35,5573	-43	54	20,3830	614579,8280	7803652,8170	23
12	-19	53	16,4322	-43	54	49,2520	613720,1320	7800557,0750	23
13	-19	52	51,2713	-43	56	9,1212	611402,3060	7801345,4160	23
14	-19	53	37,3797	-43	57	53,6199	608354,5030	7799946,8700	23
15	-19	54	36,6029	-43	59	9,6145	606133,6040	7798139,6610	23
16	-19	53	11,8306	-44	0	24,4303	603973,5700	7800758,7190	23
17	-19	52	9,0207	-43	59	57,4516	604769,6110	7802684,9840	23
18	-18	57	48,9018	-44	0	53,7762	603704,2760	7802912,1900	23
19	-19	55	8,7767	-44	1	10,2694	602619,5730	7797171,3680	23
20	-19	53	48,4845	-44	2	36,0184	600140,4550	7799654,0610	23
21	-19	56	38,7927	-44	4	32,9841	596710,4420	7794437,4990	23
22	-19	57	21,8092	-44	3	16,5561	598924,7750	7793102,7200	23
23	-19	56	48,2530	-44	0	48,3411	603239,1870	7794109,5200	23
24	-19	57	11,2456	-44	0	30,5003	603753,6490	7793399,6220	23
25	-19	58	38,0212	-44	1	45,0780	601570,3220	7790744,6220	23
26	-19	59	3,3938	-44	2	1,7083	601082,4760	7789967,4020	23
27	-20	1	49,0549	-44	1	30,7266	601953,2540	7784869,3790	23
28	-19	59	11,7393	-44	0	30,6792	603726,5520	7789695,3940	23
29	-19	59	11,8310	-43	59	48,6400	604948,3170	7789685,3060	23
30	-19	57	0,4621	-43	59	0,0856	606383,9240	7793715,4140	23
31	-19	58	10,7294	-43	59	6,7633	606176,7450	7791556,3960	23
32	-19	55	7,3607	-43	57	21,9307	609258,8670	7797174,9370	23
33	-19	55	5,4334	-43	54	44,8395	613826,8010	7797205,2410	23
34	-19	57	4,0122	-43	54	10,9456	614788,5030	7793553,3710	23
35	-19	54	17,7925	-43	53	18,6881	616341,4260	7798653,4900	23
36	-19	56	44,8018	-43	56	58,3334	609926,2490	7794175,0670	23
37	-19	57	5,5755	-43	56	49,7029	610173,1390	7793534,8560	23
38	-19	56	45,3032	-43	56	57,4305	609952,3990	7794159,4870	23
39	-19	56	17,6853	-43	56	50,9071	610147,3600	7795007,3480	23
40	-19	55	39,5576	-43	56	31,6879	610713,4820	7796175,9890	23
41	-19	55	6,7871	-43	56	48,0131	610245,1530	7797186,4210	23
42	-19	57	43,2874	-43	56	30,3935	610727,1480	7792371,9570	23

Fonte: PROGRAMA DE MONITORAMENTO HIDROLÓGICO DE BELO HORIZONTE, 2019.

Onde: S = sul e O = oeste

Inicialmente, para produção dos mapas os intervalos das séries de dados escolhidos para representar cada um dos eventos foram baseados em registros de precipitação detectados nas estações 10, 11, 12, 13, e 14, por serem próximas ao Córrego Cachoeirinha.

Dessa forma, o intervalo da chuva utilizado foi estipulado, o início da série está associado com o início da chuva e o final foi determinado quando não havia mais indício de chuva em nenhuma das 5 estações definidas. Os dados de chuva, no intervalo estipulado anteriormente, juntamente com as coordenadas geográficas em UTM (Quadro 4.4), das 42 estações de monitoramento, para cada intervalo de tempo, foram inseridos em uma planilha eletrônica.

A planilha eletrônica de dados obtida anteriormente foi utilizada como informação de entrada na realização do procedimento de interpolação espacial, que utilizou os valores de chuva em pontos conhecidos para estimar valores em locais desconhecidos, de forma a produzir os mapas de chuva dos eventos selecionados que geraram alerta. Foram produzidos mapas por meio do programa ArcMap (versão 10.5) adotando a projeção UTM datum SIRGAS 2000 e fuso Zona 23 S.

A técnica geoestatística utilizada para interpolação dos dados foi o método Inverso da Distância à Potência (IDW). Esse método foi escolhido não só por estar disponível no *software* ArcMap (versão 10.5), como também por ser uma técnica recomendada na estimação da distribuição espacial e temporal da precipitação. Além disso, este método é muito utilizado quando a área de estudo é dividida em subáreas (GILEWSKI e NAWALANY, 2018).

Sendo assim, com base nas justificativas descritas anteriormente sobre a utilização do método IDW e devido ao prazo para execução da pesquisa, foi feita uma escolha metodológica de testar e utilizar apenas o método de interpolação IDW.

Conforme descrito no item 3.3, na interpolação IDW é necessário definir o valor mínimo e máximo dos vizinhos utilizados na interpolação, esse recurso no programa ArcMap é escolhido por meio da opção *search radius*, onde é possível selecionar duas opções, a variável ou a fixa, conforme a descrição do item no programa o padrão adotado é a variável, opção que utiliza um raio variável na pesquisa para encontrar o número específico de pontos de amostras de entrada para realização do procedimento de interpolação.

Os procedimentos de interpolação utilizando o método IDW foram feitos em cada intervalo de tempo de duração dos eventos que geraram alertas, produzindo os mapas de precipitação que foram analisados visualmente, obtendo a descrição espacial da precipitação e os hietogramas de chuva.

No estudo do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica o dimensionamento do hietograma de chuva, em cada sub-bacia, deve ser preciso, para que valores obtidos por meio desse procedimento sejam os mais próximos possíveis da realidade (MARCIANO, BARBOSA e SILVA, 2017).

Sendo assim, para definição dos hietogramas de chuva formados em cada sub-bacia, foi utilizado o *shapefile* da imagem da bacia do Cachoeirinha, contendo a subdivisão da bacia disponibilizada por Siqueira, Moura e Silva (2019) (ver Figura 4.9, representação das sub-bacias). Adiante, foi selecionado o mapa de precipitação de cada evento gerado para cada intervalo de tempo, feito anteriormente na produção dos mapas.

Portanto, de posse dessas informações, utilizando o ArcMap com auxílio da ferramenta *Zonal Statistics as Table* foi possível estimar o valor da precipitação média em cada sub-bacia, por intervalo de tempo de 10 minutos até a duração total do evento, produzindo os hietogramas referente às precipitações em cada sub-bacia para cada evento que emitiu alerta na bacia.

Para implementação das próximas etapas, os hietogramas foram utilizados como dados de entrada no modelo, inseridos em cada pluviômetro das sub-bacias, ou seja, as informações de entrada no modelo são dados de precipitação. Já a saída do modelo são dados de nível d'água, que são retirados do nó onde está localizada a estação 13 (sub-bacia 25).

Portanto, com essa análise foi possível identificar a direção dos eventos, através da produção dos mapas de precipitação (primeiro objetivo específico) e também definir os hietogramas de chuva em cada sub-bacia, que foram dados de entrada nos procedimentos de modelagem, para cumprimento dos demais objetivos específicos, e descrito a seguir.

4.4 Modelagem Hidrológica (SWMM)

Nessa pesquisa foram feitas alterações somente na modelagem hidrológica. A parte hidráulica no modelo SWMM foi a mesma adotada na pesquisa de Siqueira, Moura e Silva (2019) que representou a macrodrenagem da bacia do Cachoeirinha, a microdrenagem não foi

representada. A malha hidrográfica, foi constituída pela entrada de 379 trechos de canal e 379 nós (SIQUEIRA, 2017).

Os nós representaram o início e fim dos trechos, poços de visita, desemboque dos afluentes no curso d'água principal e também a representação de singularidades como degraus. Em cada trecho, foram inseridas informações referentes ao comprimento, tipo e dimensões da seção transversal e coeficiente de rugosidade. A cada nó foram inseridos os valores de elevação e profundidade máxima do canal (SIQUEIRA, 2017). A representação da bacia de estudo no modelo SWMM, pode ser revista na Figura 4.8.

Siqueira, Moura e Silva (2019) consideraram que a chuva estava concentrada em um único pluviômetro que representou toda a bacia, como se a chuva tivesse um comportamento uniforme em toda sua extensão. Nesse caso, utilizou-se a expressão "chuva concentrada", para definir esse tipo de simulação e a calibração dos parâmetros do modelo foi realizada com a chuva concentrada. Nessa pesquisa, optou-se por estudar a chuva de forma distribuída, ou seja, em cada sub-bacia do modelo foi inserido um pluviômetro, portanto, para representar esse tipo de simulação foi utilizado o termo "chuva distribuída" e os parâmetros do modelo foram calibrados com a chuva distribuída.

Inicialmente para execução do procedimento de análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros do modelo foram utilizados todos os 56 eventos observados que geraram alerta, selecionados na série de dados, os mesmos eventos utilizados no item 4.3. Entretanto, por causa do tempo de processamento no SWMM, optou-se por reduzir a quantidade dos eventos no procedimento de análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros do modelo. Como escolha metodológica, foram desconsiderados os eventos que geraram alerta vermelho, por representarem o extravasamento do canal. O modelo utilizado representa somente as redes, galerias e calha do curso d'água, não estando nele representadas as áreas inundáveis.

Para reduzir os demais eventos que geraram alertas, foram adotados os seguintes critérios: quando existia mais de um evento com durações e valores de precipitação total próximos, foi feita uma exclusão aleatória, selecionado apenas um dos eventos. Um outro critério utilizado foi a exclusão dos eventos com direções similares, análise feita por meio dos mapas de precipitação produzidos conforme detalhado no item 4.3, relacionado ao objetivo específico a. Assim, o grupo de eventos utilizados na análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros

foram selecionados, totalizando 28 eventos, sendo que 26 eventos emitiram alerta amarelo e 2 emitiram alerta laranja.

Com relação às próximas etapas metodológicas, elas são descritas nos itens a seguir: o primeiro item 4.4.1, descreve as opções de simulação adotadas no modelo SWMM, e como foi feito o procedimento de redistribuição da vazão de base. Já o item 4.4.2, relata os procedimentos de análise de sensibilidade dos parâmetros. O item 4.4.3, descreve os procedimentos de calibração dos parâmetros. Por fim, o item 4.4.4, descreve as simulações realizadas no modelo, e está relacionado ao objetivo geral do trabalho e ao segundo objetivo específico.

4.4.1 Verificação das opções de simulação do modelo (SWMM) e redistribuição da vazão de base

Nessa etapa, foram verificadas as opções de simulação do modelo construído por Siqueira, Moura e Silva (2019), tendo como referência o manual técnico do SWMM produzido por Rossman (2012), que recomenda que para a escolha dos processos físicos em procedimentos de modelagem consideram-se os objetivos do estudo.

Dessa forma, para essa pesquisa, os processos físicos a serem considerados são, chuva/vazão e propagação de fluxo, por se tratar de uma simulação do escoamento superficial dos eventos selecionados. O modelo de infiltração adotado foi o Número da Curva (CN), por necessitar de poucas informações, sendo de fácil execução. Já para a escolha do modelo de propagação do fluxo a opção viável foi o método da onda dinâmica, por ser o mais preciso (para mais detalhes ver item 3.5.2).

Antes de iniciar os procedimentos de análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros do modelo, optou-se por redistribuir, em cada sub-bacia, a vazão de base total da bacia, $0,158 \text{ m}^3/\text{s}$, definida por PBH, 2010 *apud* Siqueira, 2017, de forma a propagar a vazão de base, proporcionando uma melhor representação hidráulica do modelo.

Portanto, com intuito de encontrar o valor da vazão de base para cada sub-bacia, foi utilizado um procedimento de regra de três simples. Primeiramente, vazão de base total da bacia foi dividida pela área total da bacia, em seguida, o valor dessa divisão foi multiplicado pela área de cada sub-bacia, e o resultado da vazão de base em cada sub-bacia foi definido. O valor foi inserido na junção mais a jusante de cada sub-bacia.

4.4.2 Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo

A análise de sensibilidade visa definir os parâmetros que mais influenciam no modelo e sua importância nos resultados gerados. Nessa pesquisa, a análise de sensibilidade foi feita utilizando o método manual, por tentativa e erro, onde o usuário vai atribuindo valores para os parâmetros. Desse modo, para alguns parâmetros foi possível considerar valores máximos e mínimos, delimitando uma faixa de variação (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 - Intervalos utilizados na análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros

Elemento	Parâmetros	Unidade	Variação dos parâmetros	
			Valor Mínimo	Valor Máximo
Sub-bacia	Coefficiente de Rugosidade de Manning - Superfície Permeável (n-permeável)	-	0,13	0,40
	Coefficiente de Rugosidade de Manning - Superfície Impermeável (n-impermeável)	-	0,011	0,024
	Capacidade de armazenamento em depressões - Superfície Permeável (s-permeável)	mm	2,54	7,62
	Capacidade de armazenamento em depressões - Superfície Impermeável (s-impermeável)	mm	1,27	2,54
Canal revestido	Coefficiente de Rugosidade de Manning (n)	-	0,012	0,018

Fonte: ROSSMAN, 2012.

Todos os parâmetros que passaram pela análise de sensibilidade foram: % de área impermeável, CN, coeficiente de rugosidade dos condutos (n), coeficiente de Manning para área impermeável (n-impermeável); coeficiente de Manning para a área permeável (n-permeável); armazenamento em depressões para a área impermeável (s-impermeável); armazenamento em depressões para a área permeável (s-permeável) e Largura de drenagem (W).

As larguras de cada sub-bacia (W) foram definidas por meios das Equações 4.1 e 4.2. De acordo com Garcia e Paiva (2006), para a determinação da largura do escoamento para cada sub-bacia foi considerado o valor referente à largura do retângulo equivalente (le).

$$le = \frac{K_c \sqrt{A}}{1,12} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{K_c} \right)^2} \right] \quad (4.1)$$

$$K_c = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (4.2)$$

Onde:

l_e = largura do retângulo equivalente (m);

A = área da sub-bacia (km²);

K_c = coeficiente de compacidade;

P = perímetro da sub-bacia (km).

Para verificar a sensibilidade dos valores dos parâmetros adotados foi calculado o Coeficiente de eficiência de *Nash* e *Sutcliffe* (COE) (ver Equação 3.4). Portanto, por meio da observação de variação do COE foram selecionados os parâmetros mais sensíveis, utilizados posteriormente no procedimento de calibração dos parâmetros no modelo.

4.4.3 Calibração dos parâmetros do modelo

Garcia e Paiva (2006) afirmam que a definição dos parâmetros do modelo SWMM no procedimento de calibração é uma tarefa complexa. O procedimento de calibração ajusta os parâmetros do modelo para que sejam produzidos resultados mais realistas. O processo de calibração dos parâmetros escolhido foi o manual, por tentativa e erro (item 3.7.1), com base apenas nos parâmetros de maior sensibilidade. Nessa etapa também foram utilizados os intervalos de variação dos parâmetros da Tabela 4.1. Para realização da verificação do desempenho da calibração, foi utilizado o cálculo do COE (ver Equação 3.4). Uma outra verificação realizada foi o monitoramento visual dos níveis de pico, de forma a aproximar o valor observado do nível d'água do valor simulado.

Nessa pesquisa optou-se por não realizar o procedimento de validação dos parâmetros do modelo, pois o modelo já tinha sido calibrado a priori no estudo realizado por Siqueira, Moura e Silva, 2019. Portanto, com o objetivo de reavaliar se o modelo estava suficientemente bem calibrado e pelo fato da série de dados disponível para realização dessa pesquisa ser maior que a obtida por Siqueira, Moura e Silva, 2019, optou-se então por realizar somente a análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros, que acredita-se ser suficiente nesse caso, para garantir maior confiabilidade das simulações a serem realizadas no modelo.

Após o procedimento de calibração dos parâmetros do modelo, para verificação do segundo objetivo específico: avaliar se o modelo utilizado é sensível para representar possíveis diferenças observadas na distribuição espacial e temporal da precipitação, foi necessário fazer uma simulação dos eventos observados de forma a investigar a eficiência do modelo na representação desses eventos. Já para o cumprimento do objetivo geral dessa pesquisa: avaliar se existe influência da variação da precipitação no espaço-tempo na resposta hidrológica de uma bacia hidrográfica urbana de pequeno porte, foi necessário simular eventos com características espaço-tempo variáveis. Para isso foi necessário criar eventos sintéticos baseado em eventos reais observados.

4.4.4 Simulação no SWMM dos eventos observados e sintéticos

Os valores dos COEs dos eventos observados que emitiram alertas, utilizados na calibração dos parâmetros do modelo (item 4.4.3), foram comparados com algumas características referentes a esses eventos utilizados na calibração: o nível d'água máximo, precipitação total, duração total, intensidade, duração até o pico e tempo de ascensão. Nessa avaliação também foi levada em consideração a direção de formação dos eventos utilizados no procedimento de calibração dos parâmetros. O objetivo era encontrar possíveis correlações entre alguma característica desses eventos com os valores dos COEs, dos mesmos eventos, e assim selecionar um grupo representativo dos eventos para serem utilizados nas simulações no modelo.

Adiante, tanto para os eventos utilizados na calibração dos parâmetros do modelo quanto para os 20 eventos utilizados nos procedimentos de modelagem selecionados na sequência, as mesmas características citadas anteriormente foram correlacionadas entre si, com intuito de verificar se algum grupo que gerou determinado tipo de alerta tinha alguma característica semelhante, o que poderia contribuir posteriormente com estudos de identificação da direção preferencial dos alertas de inundação em bacias urbanas.

Na sequência, a estratégia adotada foi gerar eventos sintéticos de mesma duração e total precipitado que os eventos observados, rotacionando os campos de chuva dos eventos observados. Esses eventos sintéticos foram simulados pelo modelo.

Portanto, para realização das próximas simulações no modelo foram selecionados 20 eventos observados: 3 eventos que emitiram alertas vermelhos extremos com maior, menor e

intermediária intensidade; 13 eventos que emitiram alertas amarelos utilizados na calibração dos parâmetros, de forma a facilitar a realização das análises a posteriori, contemplado os menores e maiores valores encontrados do COE; 1 evento que emitiu alerta laranja, escolhido de forma aleatória; e 3 eventos que não emitiram alertas e não apresentavam falhas na ascensão do linigrama, porém, tinham um total precipitado elevado.

Na etapa 4.3 foram produzidos os mapas de precipitação e os hietogramas de chuvas dos eventos observados que geraram alertas, selecionados na série de dados. Para execução da modelagem, da etapa posterior, utilizando os 20 eventos selecionados para execução das simulações, definidos anteriormente, foi necessário fazer os mapas de precipitação e os hietogramas de chuva dos eventos que não emitiram alertas, conforme metodologia detalhada no item 4.3.

Adiante, com o objetivo de verificar a eficiência do modelo hidrológico em representar os alertas observados, ou seja, eventos reais de chuva ocorridos na bacia, os 20 eventos observados, escolhidos anteriormente, foram simulados no modelo, essa etapa foi rotulada como "Alertas Simulados".

Posteriormente, com intuito de averiguar o comportamento da tempestade, considerando o mesmo evento chuvoso, em diferentes direções no espaço, o ângulo de direção do deslocamento da chuva, dos 20 eventos observados selecionados anteriormente, foram calculados, utilizando a metodologia do autor Diskin (1987) (ver item 3.8).

Após, optou-se nessa pesquisa por definir para cada ângulo encontrado o coeficiente de determinação, que é a razão entre a soma dos quadrados devidos à regressão e a soma total dos quadrados, definindo a medida descritiva da qualidade dos valores encontrados para cada ângulo obtido (NAGHETTINI e PINTO, 2007).

Em seguida, de posse dos ângulos das chuvas, independente do sinal encontrado no ângulo, que indica a direção do giro, os campos de chuva foram rotacionados. Inicialmente, os campos de chuva foram rotacionados até a posição de 360° na direção sul-norte. Por exemplo, se o ângulo encontrado fosse de 20°, para chegar a posição de 360° o campo de chuva era rotacionado -20°. Após, ao colocar a chuva posicionada na direção sul-norte a 360°, foram feitos giros de 90° na direção oeste-leste, 180° na direção norte-sul e 270° na direção leste-oeste, respectivamente.

Portanto, de forma a ilustrar, a Figura 4.9 mostra os mapas de chuva de um evento real que ocorreu no dia 05/03/2018 - evento 2, em um espaço de tempo de 20 minutos, tempo de emissão do alerta na bacia. O mapa de precipitação (A) representa a direção do evento real. Adiante, são apresentados os mapas de precipitação dos eventos sintéticos em cada direção considerada, 360° (B), 90° (C), 180° (D) e 270° (E), nessa ordem.

Em todas as análises foram avaliados visualmente os sentidos das precipitações. As rotações foram realizadas utilizando-se as coordenadas do centróide da bacia, como ponto de referência. Os sentidos dos eventos são os geográficos, onde o norte está localizado a 0°, ou 360°.

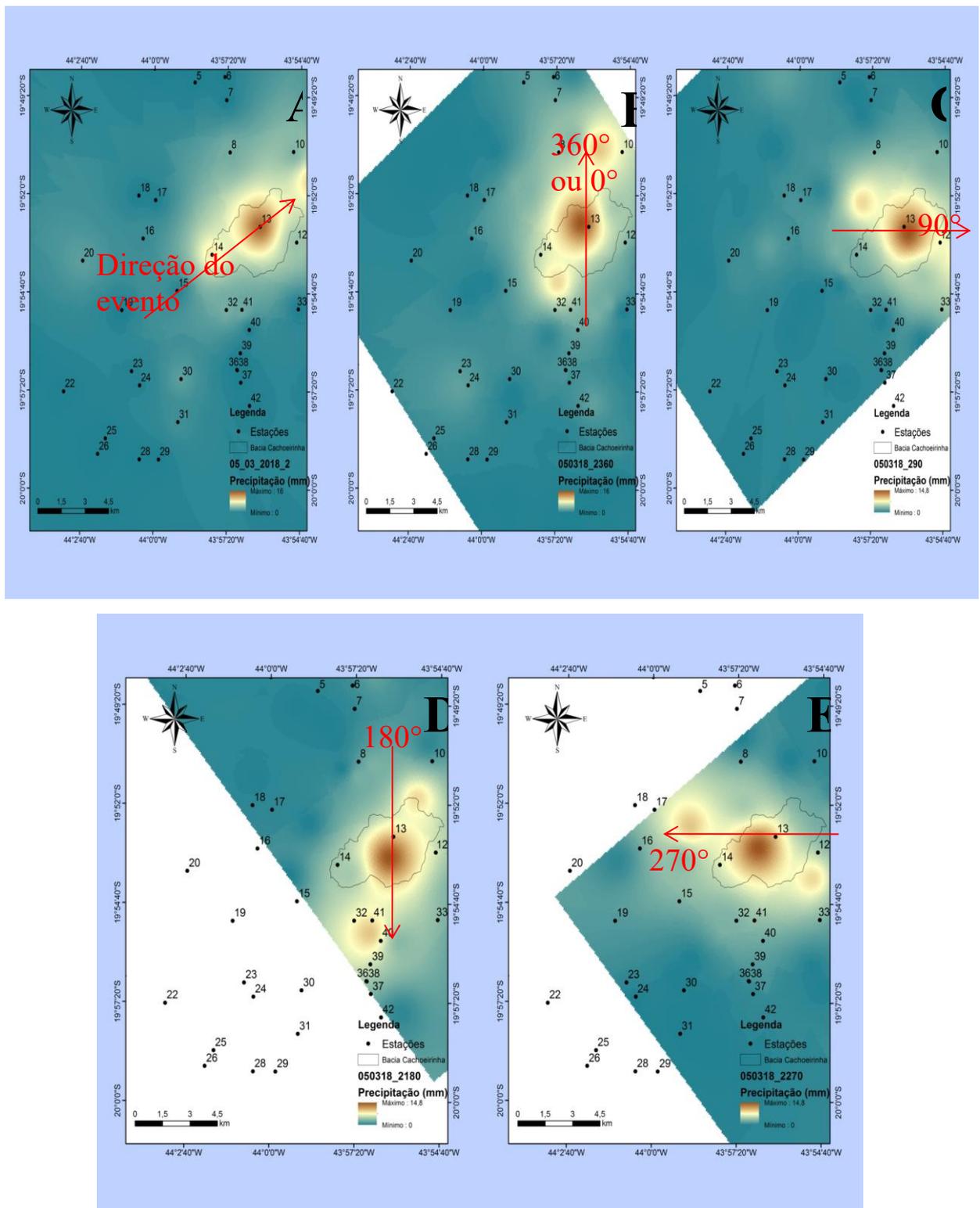


Figura 4.9 - (A) Evento 05/03/18 20 min direção do evento real; (B) Evento 05/03/18 20 min - 360°; (C) Evento 05/03/18 20 min - 90°; (D) Evento 05/03/18 20 min - 180°; (E) Evento 05/03/18 20 min - 270°

Na sequência, foram produzidos os mapas de chuva e os hietogramas, dos eventos sintéticos, para cada sub-bacia nas direções analisadas, essa etapa foi rotulada como "Alertas Sintéticos".

Para mais detalhes da produção dos mapas e dos hietogramas de chuva rever os métodos descritos no item 4.3.

4.5 *Simulação chuva distribuída e concentrada*

Esse item descreve os procedimentos realizados para simulações referentes ao terceiro objetivo específico: avaliar se utilizar a precipitação distribuída espacialmente traz melhores resultados do que utilizar um valor único de precipitação homogêneo para a bacia. A Figura 4.10 mostra um fluxograma das etapas para execução desse item.

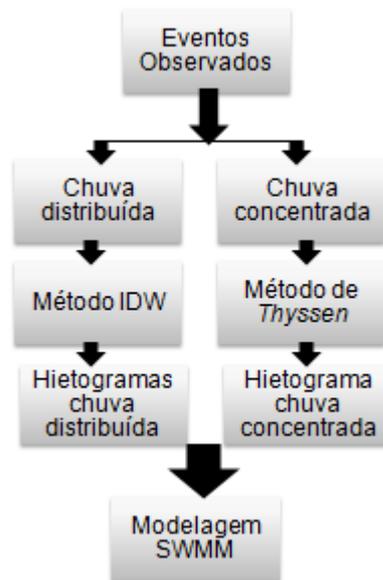


Figura 4.10 - Etapas do procedimento de simulação da chuva distribuída e concentrada

Na realização desse procedimento de simulação foram considerados eventos observados que geraram alertas, os mesmos considerados nas simulações do item 4.4. Inicialmente, considerando a chuva de forma distribuída por sub-bacia, ou seja, com pluviômetros inseridos em cada sub-bacia (Figura 4.11), os mapas de chuva dos eventos utilizando o método de interpolação da precipitação IDW e os hietogramas de chuva dimensionados em cada sub-bacia foram os mesmos produzidos no procedimento do item 4.4.4, "Alertas Simulados".

Após, foi realizada uma simulação com os mesmos eventos que emitiram alertas utilizados anteriormente, porém concentrando a chuva em um único pluviômetro (Figura 4.12) a interpolação da precipitação foi feita aplicando o método de *Thiessen*, acredita-se que esse método seja suficiente para implementar o objetivo desse item, e em seguida, o hietograma de chuva foi definido.

Os hietogramas, tanto para precipitação considerada de forma distribuída quanto concentrada por sub-bacia foram dados de entrada no SWMM, para realização do procedimento de modelagem. Ambos os procedimentos foram realizados com os parâmetros do modelo calibrados considerando a chuva distribuída por sub-bacia. Nesse procedimento espera-se definir a melhor forma de representação da chuva na modelagem.

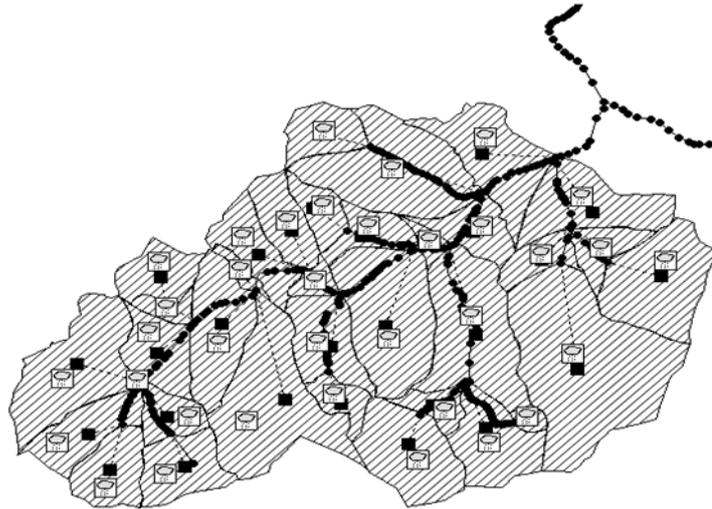


Figura 4.11 - Representação da bacia do Córrego Cachoeirinha no modelo SWMM, considerando a chuva distribuída
Fonte: Adaptado de SIQUEIRA, MOURA e SILVA, 2019.

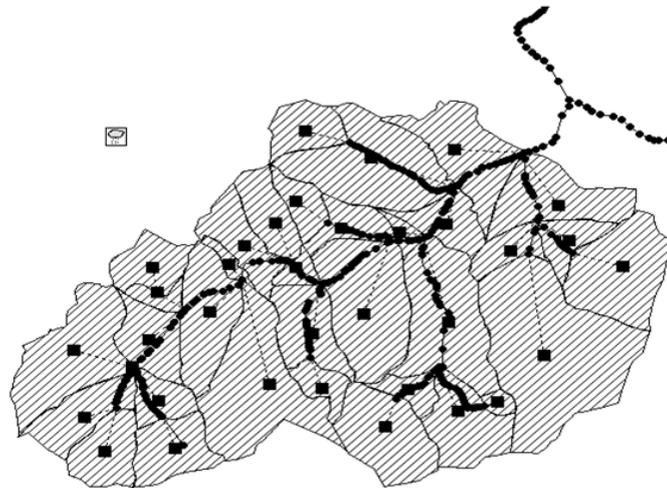


Figura 4.12 - Representação da bacia do Córrego Cachoeirinha no modelo SWMM, considerando a chuva concentrada
Fonte: Adaptado de SIQUEIRA, MOURA e SILVA, 2019.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

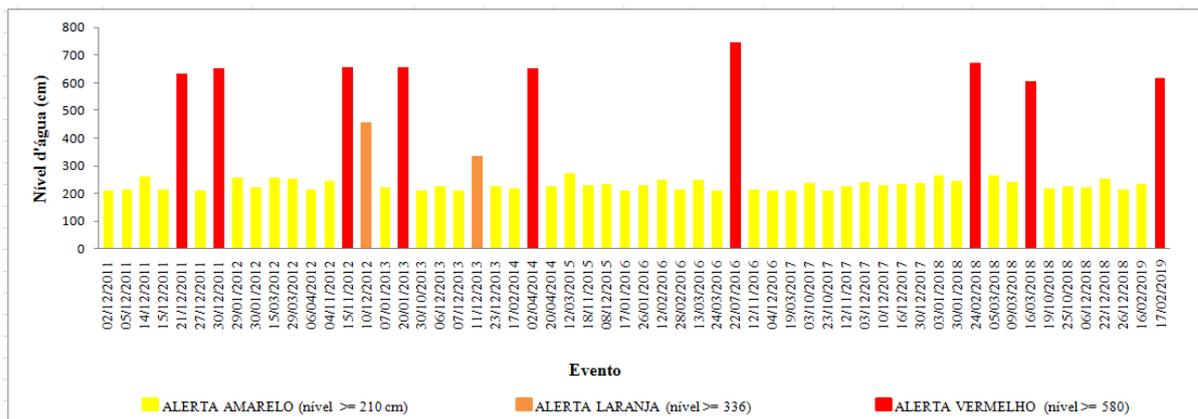
Este capítulo apresenta os resultados da pesquisa, divididos em cinco subtópicos, o subtópico 5.1, descreve os eventos utilizados em cada etapa da pesquisa. O item seguinte 5.2, mostra a

avaliação do comportamento da precipitação no espaço e no tempo e construção dos hietogramas de chuva no modelo. O subtópico 5.3, apresenta os resultados da análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros, e também apresenta quais foram os eventos selecionados para realização das simulações no modelo. O subtópico 5.4, descreve os resultados encontrados para os ângulos de cada evento. Em seguida, esse tópico mostra os resultados dos alertas simulados e alertas sintéticos, rotacionados a 360°, 90°, 180° e 270°. Por fim, o subtópico 5.5, apresenta os resultados da modelagem da chuva concentrada e distribuída.

5.1 Seleção dos eventos

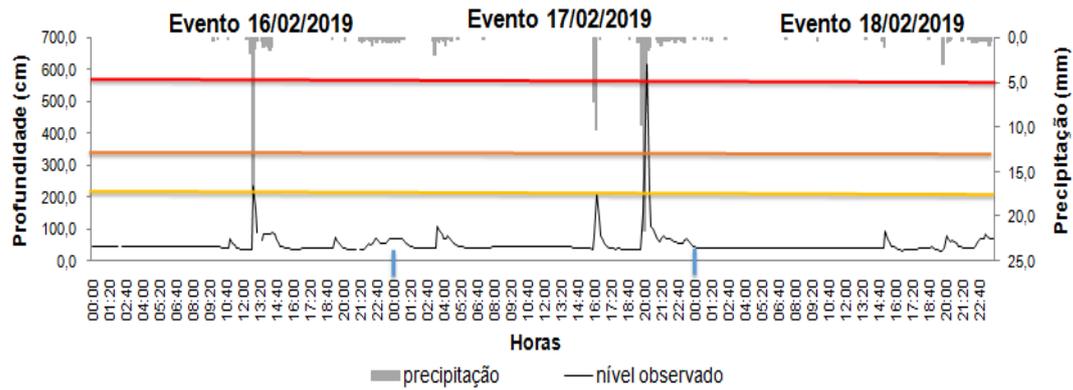
De posse da série de dados considerada de setembro de 2011 a maio 2019, foram verificados os eventos que geraram alertas. O Gráfico 5.1 apresenta um resumo da quantidade de eventos para cada tipo de alerta emitido, por ano.

Gráfico 5.1 - Quantidade total de eventos que emitiram alertas, na série de dados de 2011 - 2019 - 58 eventos



De acordo com o Gráfico 5.1, foram emitidos 58 eventos que geraram alertas na série de dados analisada, sendo 9 alertas vermelhos, 2 alertas laranjas e 47 alertas amarelos. Sendo notório que a maioria dos alertas emitidos são amarelos. A princípio quando foi gerado mais de um alerta no mesmo dia o evento recebeu a classificação com relação ao maior nível d'água observado. No APÊNDICE 1, são apresentados todos os eventos que geraram alertas, destacando data, horário, nível d'água e classificação do alerta gerado.

Subsequentemente, com a finalidade de realizar algumas verificações e identificar possíveis falhas na série de dados foi feita uma análise gráfica relacionando a profundidade *versus* tempo (linigrama) e a precipitação *versus* tempo (hietograma) de cada evento que emitiu alerta contemplando também o dia anterior e posterior ao alerta, conforme o exemplo apresentado no Gráfico 5.2, que demonstra a chuva que ocorreu no dia 17/02/2019.

Gráfico 5.2 - Evento do dia 17/02/2019

No Gráfico 5.2 foi possível observar o comportamento do evento gerado no dia 17/02/2019, que emitiu alerta amarelo e vermelho. No dia anterior, 16/02/2019, foi emitido um alerta amarelo. No dia posterior, 18/02/2019, não houve emissão de alerta. Para esse evento não foram detectadas falhas na série de dados.

Em seguida, após a análise gráfica foram feitas algumas verificações, considerando os eventos que emitiram mais um alerta no mesmo dia, sem a redução brusca do nível d'água entre a emissão desses alertas, o evento continuou a receber a classificação com relação ao maior nível observado.

Porém, quando o evento gerava um alerta e após o nível d'água voltava a atingir valores baixos gerando um novo alerta o evento foi dividido em dois, 17/02/2019 - evento 1 (alerta amarelo) e 17/02/2019 - evento 2 (alerta vermelho). O mesmo ocorreu no dia 05/03/2018, em que foram detectados dois alertas amarelos, sendo dividido em 05/03/2018 - evento 1 e 05/03/2019 - evento 2, por ordem de ocorrência dos alertas amarelos (ver Gráfico 5.3). Ainda de posse dessa análise gráfica, foram eliminados alguns eventos. A Tabela 5.1 apresenta um resumo dos eventos excluídos.

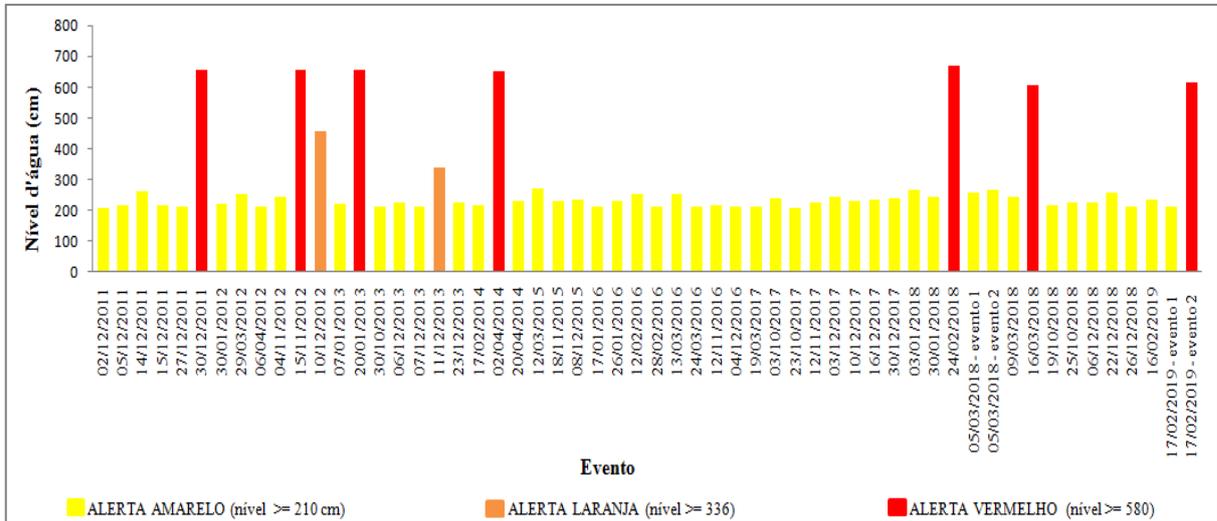
Tabela 5.1 - Eventos que foram excluídos na pesquisa

ANO	DATA	HORA	NÍVEL	ALERTA	MOTIVO
2011	21/12/2011	18:40:00	632,0	VERMELHO	Não teve registro de chuva
2012	29/01/2012	21:30:00	259,0	AMARELO	Falha na ascensão do linigrama com alerta amarelo
	15/03/2012	20:40:00	260,0	AMARELO	
2016	22/07/2016	12:50:06	746,0	VERMELHO	Não teve registro de chuva

Conforme a Tabela 5.1 os eventos do dia 21/12/2011 e 22/07/2016 foram excluídos por não ter registro de chuva identificado em nenhuma das 42 estações de monitoramento de Belo

Horizonte. Já os eventos do dia 29/01/2012 e 15/03/2012, foram retirados por ter sido detectado falha na ascensão do linigrama no intervalo de emissão dos alertas amarelos. Portanto, para execução da pesquisa foi identificado um total de 56 eventos que geraram alertas, apresentados no Gráfico 5.3.

Gráfico 5.3 - Representação dos eventos disponíveis na pesquisa, que geraram alertas - 56 eventos



No Gráfico 5.3 é possível observar que estavam disponíveis para utilização, 47 alertas amarelos, 2 alertas laranjas e 7 alertas vermelhas. Essa quantidade de eventos selecionada teve o intuito de estudar o maior número possível de cenários de chuva que acionaram alertas na bacia do Córrego Cachoeirinha no período de setembro de 2011 a maio de 2019. Porém, de forma a viabilizar as simulações no modelo foram selecionados grupos de eventos que geraram alertas, para realização dos procedimentos seguintes. A Tabela 5.2 mostra todos os eventos observados que foram utilizados em cada etapa da pesquisa, com exceção dos 56 eventos selecionados para execução do item 4.3, relacionado ao objetivo específico a.

Tabela 5.2 - Eventos observados, utilizados nas etapas da pesquisa com representação dos alertas emitidos

Eventos Observados	Sensibilidade e calibração dos parâmetros	Alertas simulados	Alertas sintéticos	Chuva concentrada e distribuída
02/12/2011				
05/12/2011				
12/12/2011				
15/12/2011				
27/12/2011				
30/12/2011				

Eventos Observados	Sensibilidade e calibração dos parâmetros	Alertas simulados	Alertas sintéticos	Chuva concentrada e distribuída
30/01/2012				
29/03/2012				
10/12/2012				
30/10/2013				
07/12/2013				
11/12/2013				
17/02/2014				
03/04/2014				
20/04/2014				
12/03/2015				
18/11/2015				
08/12/2015				
17/01/2016				
28/02/2016				
24/03/2016				
12/11/2016				
19/03/2017				
03/12/2017				
16/12/2017				
05/03/2018- evento 1				
05/03/2018- evento 2				
16/03/2018				
19/10/2018				
22/12/2018				
26/12/2018				
05/02/2019				
17/02/2019- evento 1				
17/02/2019- evento 2				

	alerta amarelo
	alerta laranja
	alerta vermelho
	eventos não utilizados na etapa
	eventos que não emitiram alerta

5.2 Descrição espacial e temporal da precipitação e construção dos hietogramas de chuva, no modelo

Com relação à distribuição espacial e temporal da precipitação foram produzidos os mapas de campos de precipitação, associados ao primeiro objetivo específico, e definidos os hietogramas de chuva, em cada sub-bacia, relacionados ao procedimento de modelagem, para todos os 56 eventos que geraram alertas utilizados na pesquisa. Com os mapas de chuva foi possível

observar, em cada intervalo de tempo e em diferentes direções, o comportamento da tempestade, tendo como referência a bacia em análise. Na Figura 5.1 é possível observar um exemplo do mapa de precipitação produzido para o evento do dia 05/03/2018 - evento 2, com evolução temporal a cada 10 minutos.

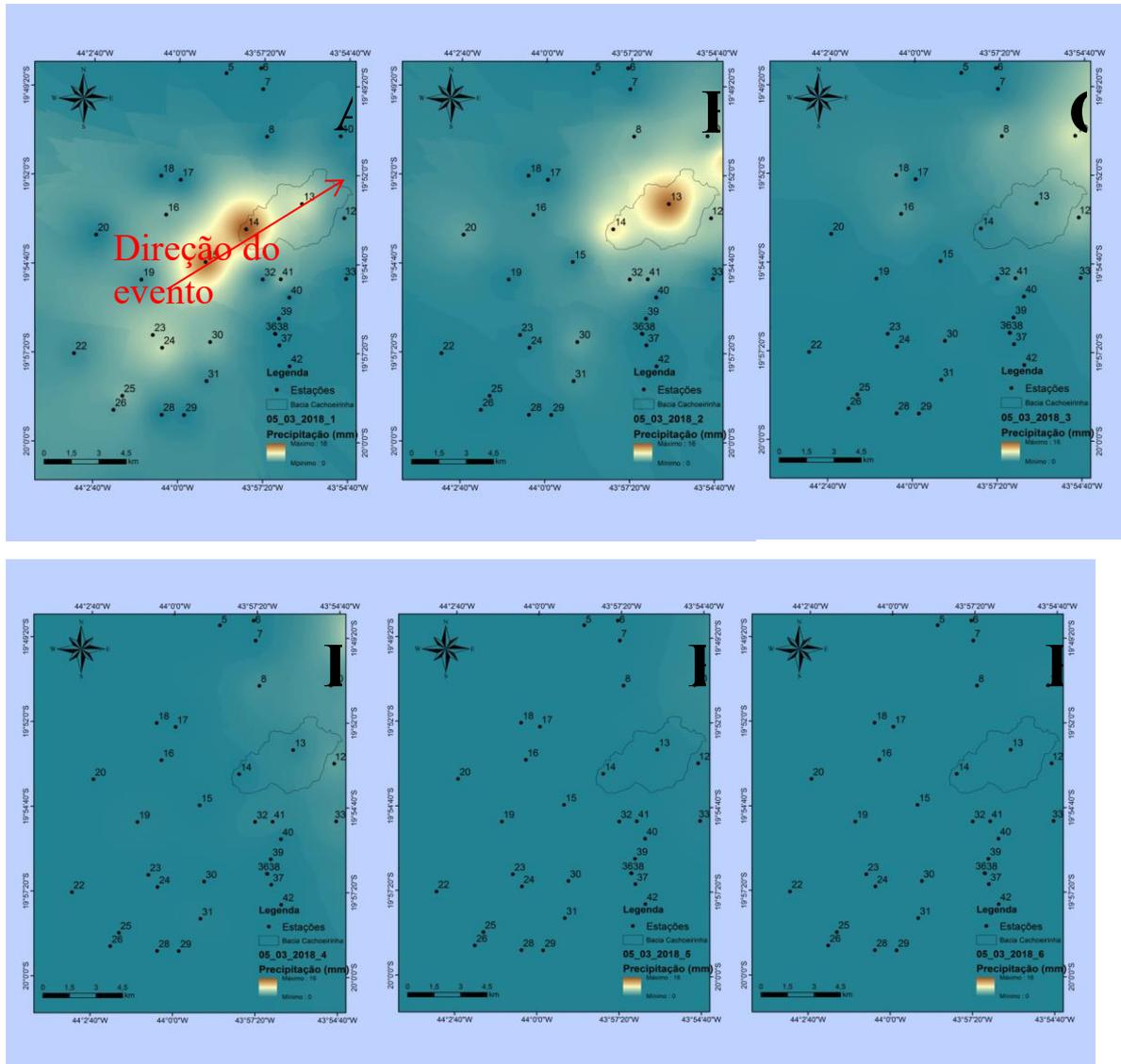


Figura 5.1- (A) Evento 05/03/18 10 min; (B) Evento 05/03/18 20 min; (C) Evento 05/03/18 30 min; (D) Evento 05/03/18 40 min; (E) Evento 05/03/18 50 min; (F) Evento 05/03/18 60 min

O alerta emitido no evento da Figura 5.1 foi amarelo. Tendo a bacia do Cachoeirinha como orientação, foi possível observar que o deslocamento da chuva foi de montante para jusante da bacia. Para os demais eventos que geraram alertas selecionados (Gráfico 5.3), tendo a bacia de estudo como orientação, foram identificados para os alertas amarelos que, 40 eventos estavam na direção de montante para jusante e 7 eventos estavam na direção de jusante para montante.

Para os alertas laranjas, foi contabilizado 1 evento na direção de montante para jusante e 1 evento na direção de jusante para montante. Por fim, com relação aos alertas vermelhos, foram detectados 4 eventos que estavam na direção de montante para jusante e 3 eventos que estavam na direção de jusante para montante.

Portanto, como pode ser observado a maior parte dos eventos que geraram alertas vieram na direção de montante para jusante da bacia, totalizando 45 eventos do total de 56 eventos selecionados que geraram alertas, tal resultado está em conformidade com a literatura. De acordo com Mateo-Lázaro *et al.*, 2014 na representação do escoamento superficial dos eventos de tempestade, os eventos tem uma direção preferencial de montante para jusante da bacia.

No APÊNDICE 2 é possível verificar os mapas de chuva construídos, para os 20 eventos observados (mostrados na Tabela 5.2) selecionados na realização das etapas de modelagem, alertas simulados, alertas sintéticos e chuva concentrada e distribuída.

Para exemplificar o resultado da construção dos hietogramas de chuva em cada sub-bacia a Figura 5.2 apresenta como exemplo o dia 05/03/2018 - evento 2. A numeração do hietograma corresponde à mesma utilizada para identificar as sub-bacias no modelo.

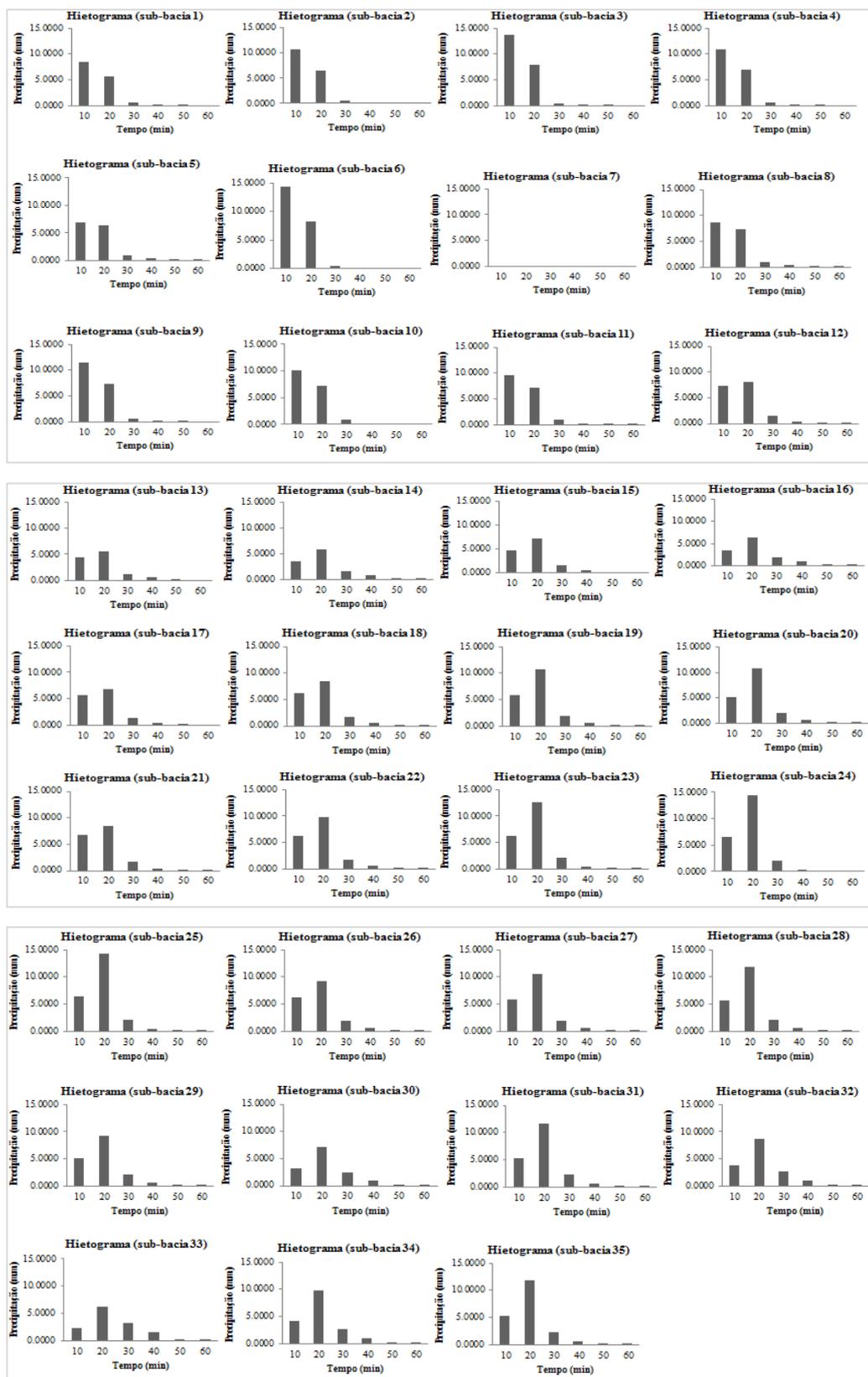


Figura 5.2 - Hietogramas de chuva do evento 05/03/2018 - evento 2

Os resultados dessa etapa foram importantes, com a produção dos mapas de precipitação foi possível definir a direção de deslocamento dos eventos, que serviu como subsídio para seleção do grupo de eventos utilizados na análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros do modelo e também na correlação entre o COE e algumas características dos eventos utilizados na calibração, com o intuito de selecionar um grupo de eventos para execução das etapas posteriores. Grande parte dos hietogramas de chuvas obtidos nesse item foram utilizados em algumas etapas posteriores.

5.3 Análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros do modelo, e eventos selecionados para simulações

Para execução da análise de sensibilidade e calibração dos parâmetros do modelo foram selecionados os hietogramas de chuva, de cada sub-bacia, dos 28 eventos que geraram alerta (ver Tabela 5.2). No item 5.3.1, são descritos os resultados relacionados à análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo. O item 5.3.2, apresenta os resultados da calibração dos parâmetros do modelo. E por fim, no item 5.3.3, são apresentados os eventos selecionados para realização dos procedimentos de simulações no modelo.

5.3.1 Resultados da análise de sensibilidade dos parâmetros

Observando o valor do COE, calculado para cada parâmetro, os resultados apontaram que a variação da porcentagem de área impermeável foi um dos parâmetros mais sensíveis, o que condiz com a literatura. As pesquisas realizadas por Garcia e Paiva (2006); Beling, Paiva e Paiva 2013; Faria, Barbassa e Silveira (2016) e Formiga *et al.*, 2016, também concluíram que a porcentagem de área impermeável é um dos parâmetros mais sensíveis do modelo.

Todos os outros parâmetros do modelo que também apresentaram sensibilidade e foram posteriormente calibrados são: CN, largura de drenagem (W), coeficiente de rugosidade dos condutos (n), coeficiente de Manning para área impermeável (n-impermeável); coeficiente de Manning para a área permeável (n-permeável); armazenamento em depressões para a área impermeável (s-impermeável) e armazenamento em depressões para a área permeável (s-permeável).

5.3.2 Resultados da calibração dos parâmetros

O CN, % de área impermeável e W foram parâmetros que optou-se por definir um valor distinto para cada sub-bacia. Porém, para o CN e a % de área impermeável no procedimento de calibração não foi possível encontrar valores melhores dos que já tinham sido adotados na pesquisa de Siqueira, Moura e Silva (2019). Já para W foi possível obter uma melhora com relação aos valores considerados (Tabela 5.3).

O restante dos parâmetros, que optou-se por definir um valor único para todas sub-bacias foram: coeficiente de Manning para área impermeável (n-impermeável); coeficiente de Manning para a área permeável (n-permeável); armazenamento em depressões para a área impermeável (s-impermeável); armazenamento em depressões para a área permeável (s-permeável) e o coeficiente de rugosidade dos condutos (n).

O coeficiente de rugosidade dos condutos nessa pesquisa obteve o mesmo valor encontrado pela pesquisa de Siqueira, Moura e Silva (2019), 0,017. Nas Tabelas 5.3 e 5.4 são apresentados os resultados que foram divergentes na calibração dos parâmetros do modelo encontrados nessa pesquisa e no estudo realizado por Siqueira, Moura e Silva (2019).

Tabela 5.3 - Parâmetros do modelo SWMM

Parâmetros para todas sub-bacias	Valor definido na pesquisa	Valor definido na pesquisa de Siqueira, Moura e Silva (2019)
n-impermeável	0,013	0,014
n-permeável	0,28	0,25
s-impermeável	1,78	1,87
s-permeável	3,61	2,54

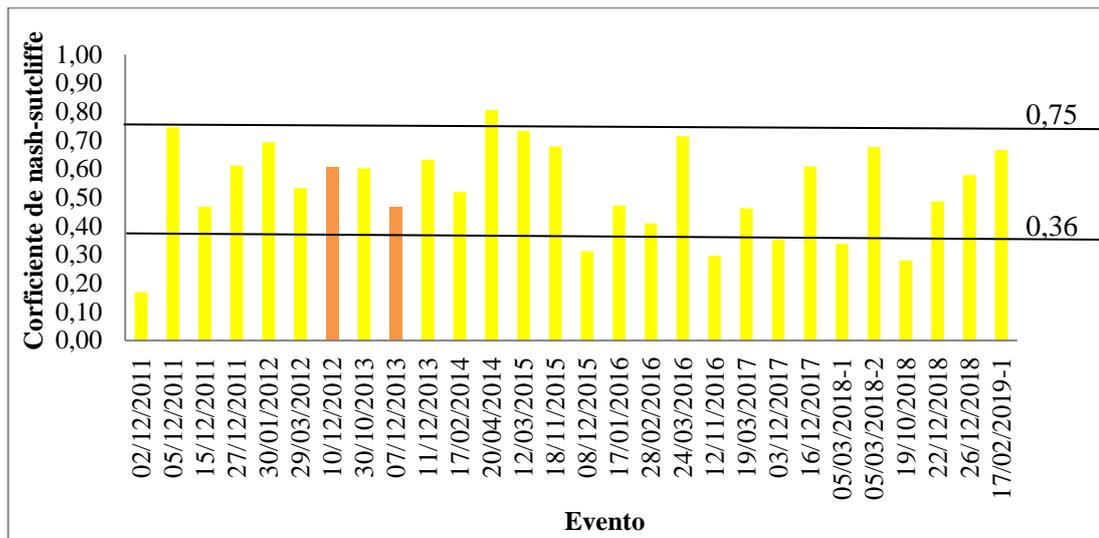
Tabela 5. 4 - Resultados da largura da bacia (W) para cada sub-bacias, em metro

Sub-bacia	Parâmetro definido pela pesquisa	Parâmetro definido por Siqueira, Moura e Silva (2019)
SB1	414,70	870,39
SB2	506,45	834,90
SB3	294,36	863,77
SB4	303,78	652,28
SB5	426,46	1418,35
SB6	467,16	1263,57
SB7	8,38	39,12
SB8	419,17	1067,95
SB9	311,73	836,65
SB10	124,78	432,12
SB11	348,17	760,13
SB12	88,67	356,57
SB13	1153,41	1098,49
SB14	420,64	981,67
SB15	167,39	543,53
SB16	353,73	336,88
SB17	199,93	565,04
SB18	351,18	912,17
SB19	736,82	1336,68
SB20	495,49	1329,77
SB21	249,91	816,64
SB22	176,78	426,38
SB23	226,38	675,50
SB24	103,42	378,59
SB25	242,09	746,54
SB26	348,07	780,43
SB27	241,07	612,99
SB28	541,53	1363,02
SB29	384,05	740,64
SB30	803,66	1818,04
SB31	217,73	616,83
SB32	229,21	644,13
SB33	702,20	1202,81
SB34	391,05	1069,22
SB35	318,07	1097,05

O mesmo modelo desenvolvido por Siqueira, Moura e Silva (2019) foi usado para execução dessa pesquisa, com alterações (ver item 4.2.3). Outros fatores adotados na pesquisa foram diferentes como, a escolha dos eventos que geraram alertas utilizados na calibração dos parâmetros do modelo, o método utilizado para o cálculo da largura da bacia e o fato da chuva ser considerada distribuída, ou seja, com um pluviômetro em cada sub-bacia. Portanto, como pode ser observado nas Tabelas 5.3 e 5.4, os valores dos parâmetros encontrados nas duas pesquisas são distintos, devido aos fatores anteriormente citados, os resultados não podem ser diretamente comparados.

Nas pesquisas realizadas por Segond, Wheater e Onof (2007); Douinot *et al.* (2015; Gilewski e Nawalany (2018) e Siqueira, Moura e Silva (2019), o desempenho do modelo foi analisado utilizando o Coeficiente de Eficiência de *Nash e Sutcliffe* (COE). Segundo Collischonn (2001), para valores de COE maiores que 0,75, o desempenho do modelo é considerado adequado. Já para valores de COE entre 0,36 a 0,75, o desempenho é classificado como aceitável. Por fim, para valores de COE abaixo de 0,36, o modelo é considerado inaceitável. O Gráfico 5.4 mostra os valores dos COEs encontrados para cada evento.

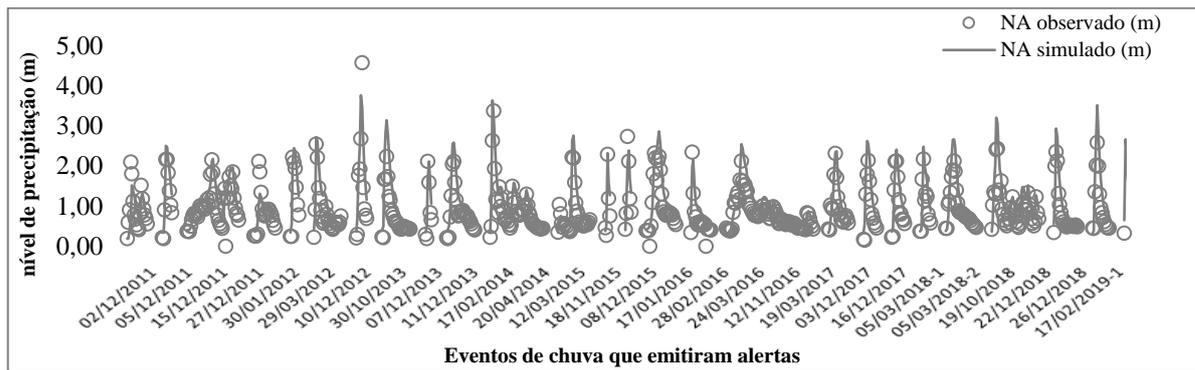
Gráfico 5.4 - Relação do COE por evento



Observando o Gráfico 5.4 foi notório que a maior parte dos eventos tiveram COE dentro da faixa do desempenho classificado como aceitável, 0,36 a 0,75. Portanto, o modelo SWMM obteve resultados favoráveis na simulação dos eventos através da calibração de seus parâmetros.

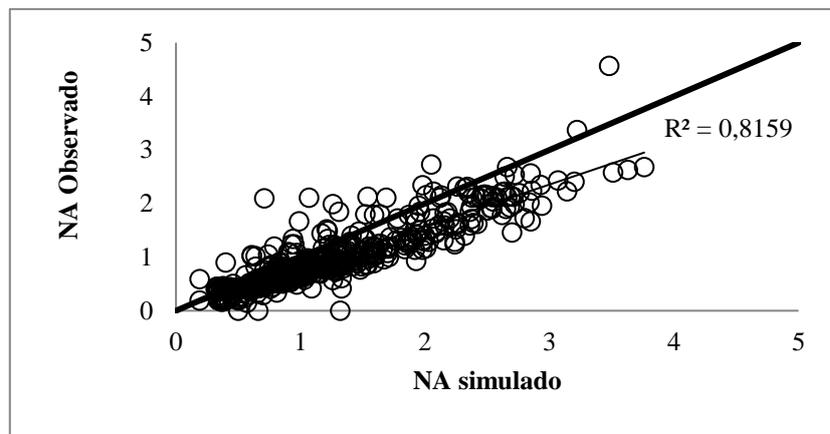
Ewen (2011) descreve que uma etapa típica do procedimento de calibração é a comparação dos hidrogramas simulados e observados. Mesmo utilizando os métodos automáticos mais modernos disponíveis, nada substitui os olhos e cérebro do hidrólogo. O Gráfico 5.5 apresenta a relação do nível de água observado e o simulado pelo modelo para cada evento utilizado na calibração.

Gráfico 5.5 - Relação do nível de água observado e simulado por evento, no procedimento de calibração dos parâmetros do modelo



De acordo com o Gráfico 5.5, foi possível observar que o modelo representa satisfatoriamente os eventos iniciais da série, acertando na maioria das vezes os níveis de pico. Em contrapartida, com relação aos eventos mais recentes da série, o nível d'água (NA) simulado tem um pico maior que o observado. Mas, no geral, o modelo representa bem os níveis de pico. Já o Gráfico 5.6 apresenta todos os valores de níveis d'água simulados e observados, para todos os 28 eventos utilizados na calibração, em cada intervalo de tempo.

Gráfico 5.6 - Correlação entre o nível de água observado e simulado



No Gráfico 5.6, observa-se uma boa correlação linear existente entre os valores observados e simulados para os eventos considerados na calibração, com um coeficiente de correlação de 0,815. Já com relação a bisetriz a tendência do modelo é subestimar os níveis de pico, principalmente para os eventos com maiores valores de nível d'água observados.

Portanto, tendo em vista que o desempenho do modelo já era satisfatório com a calibração realizada por Siqueira, Moura e Silva (2019) e que ao se realizar a calibração no presente trabalho pouco se modificou com relação aos parâmetros, optou-se por prescindir da etapa de validação do modelo. Por conseguinte, os resultados relacionados à calibração dos parâmetros

na modelagem hidrológica apontam ser possível representar a chuva de forma distribuída, por sub-bacia, evidenciando um bom ajuste em relação à simulação do escoamento. A Tabela 5.5 apresenta características dos 28 eventos observados, que geraram alertas utilizados na calibração.

Tabela 5.5 - Características dos eventos da calibração

Data	NA max (cm)	Pt (mm)	Dt (min)	i (mm/h)	Pp (mm)	ta (min)	COE
02/12/2011	210,0	14,2	50	17,4	11,2	40,00	0,17
05/12/2011	216,0	32,0	90	21,33	27,2	50,00	0,74
15/12/2011	215,0	66,6	450	8,88	34,6	220,00	0,47
27/12/2011	211,0	21,0	190	6,63	7,8	50,00	0,61
30/01/2012	222,0	24,2	80	18,15	11,2	30,00	0,69
29/03/2012	254,0	42,2	240	10,55	19,4	30,00	0,53
10/12/2012	457,0	52,0	100	31,20	51,8	60,00	0,61
30/10/2013	211,0	11,4	60	11,40	9,2	30,00	0,60
07/12/2013	337,0	42,0	250	10,08	32,6	70,00	0,47
11/12/2013	228,0	72,0	460	9,39	33,0	40,00	0,63
17/02/2014	222,0	67,6	280	14,49	25,6	130,00	0,52
20/04/2014	229,0	10,4	50	12,48	4,6	30,00	0,81
12/03/2015	273,0	24,6	60	24,60	22,2	30,00	0,73
18/11/2015	232,0	73,6	260	16,98	32,0	80,00	0,68
08/12/2015	234,0	20,4	180	6,80	16,0	20,00	0,31
17/01/2016	211,0	85,6	750	6,85	27,0	140,00	0,47
28/02/2016	214,0	48,8	120	24,40	45,8	50,00	0,41
24/03/2016	212,0	25,0	120	12,50	18,8	50,00	0,71
12/11/2016	217,0	18,6	100	11,16	14,6	40,00	0,30
19/03/2017	212,0	44,4	270	9,87	29,6	80,00	0,46
03/12/2017	243,0	73,0	410	10,68	30,0	60,00	0,35
16/12/2017	235,0	27,6	210	7,89	16,2	30,00	0,61
05/03/2018-evento 1	258,0	42,6	150	17,04	34,0	50,00	0,34
05/03/2018-evento 2	268,0	23,8	60	23,80	21,4	20,00	0,46
19/10/2018	216,0	14,2	100	8,52	13,4	60,00	0,71
22/12/2018	256,0	42,4	70	36,34	33,6	40,00	0,46
26/12/2018	214,0	30,6	220	8,35	15,6	50,00	0,60
17/02/2019-evento 1	213,0	17,8	70	15,26	17,6	30,00	0,65

Nota: NA max: nível d'água máximo; Pt: precipitação total; Dt: duração total; i: intensidade da precipitação; Pp: precipitação até o pico; ta: tempo de ascensão; COE: Coeficiente de *Nash e Sutcliffe*.

Na sequência, os Gráficos 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 correlacionam cada característica da Tabela 5.5 com o COE, dos eventos utilizados na calibração, inclusive sobre o ponto de vista da direção dos eventos (montante/jusante) com intuito de encontrar grupos de eventos com informações similares para realização das simulações no modelo.

Gráfico 5.7 - Nível máximo versus COE

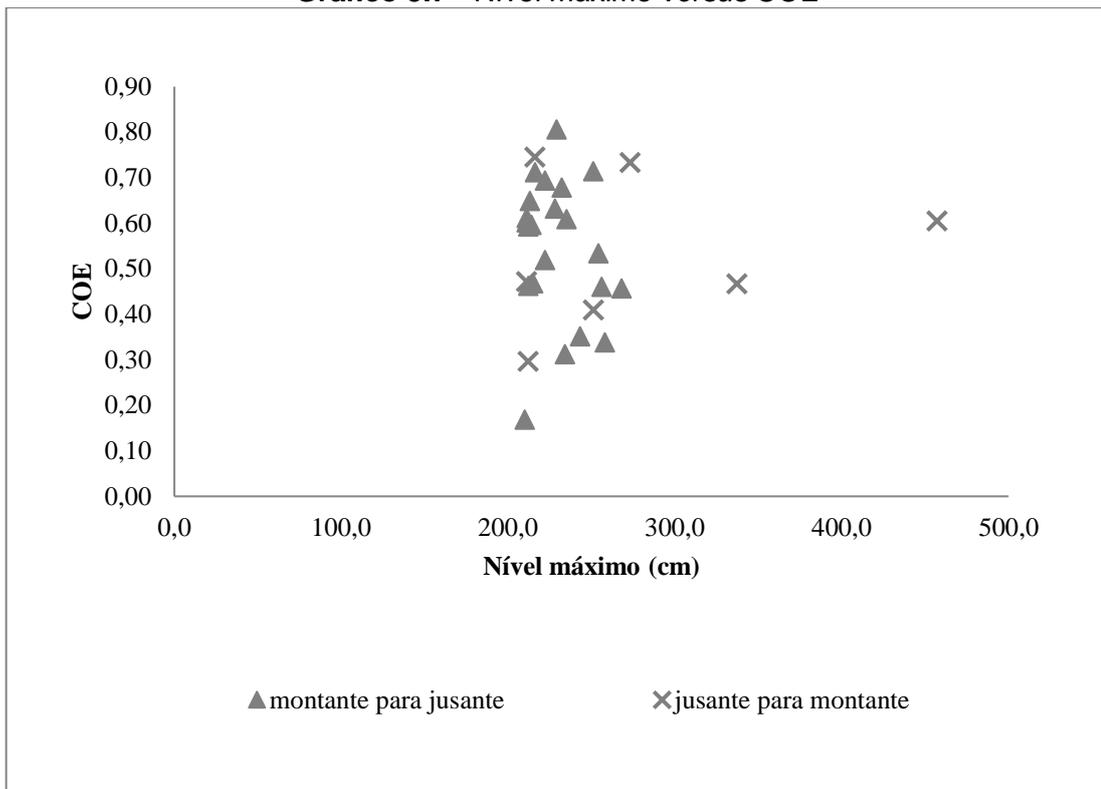


Gráfico 5.8 - Precipitação total do evento versus COE

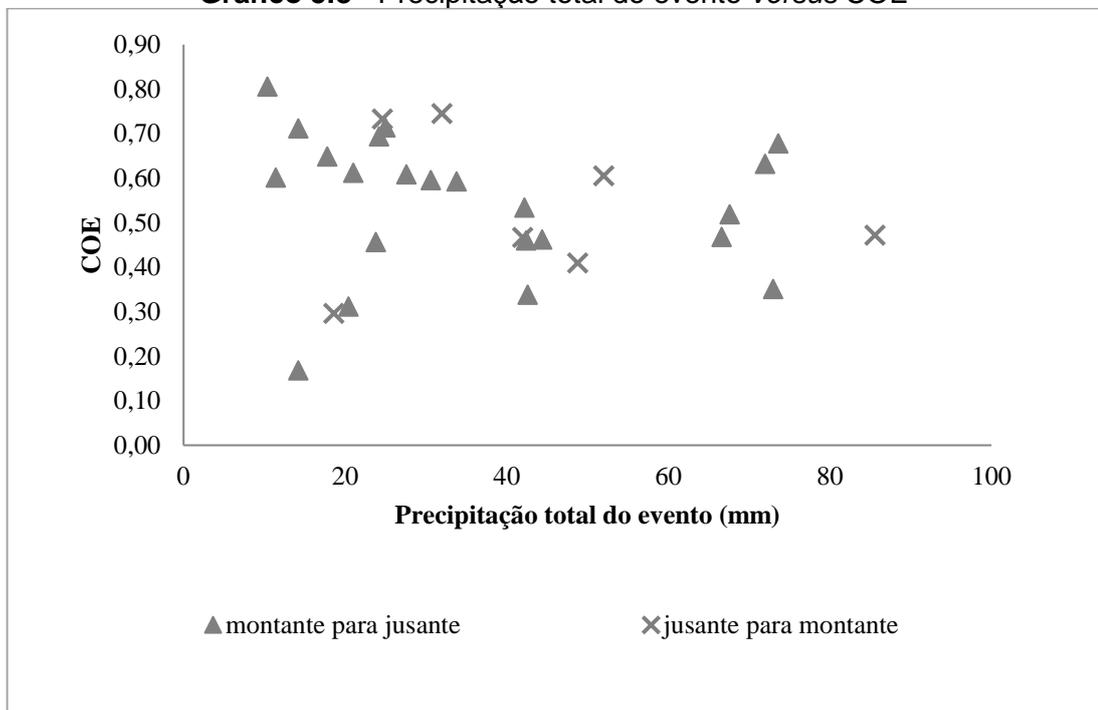


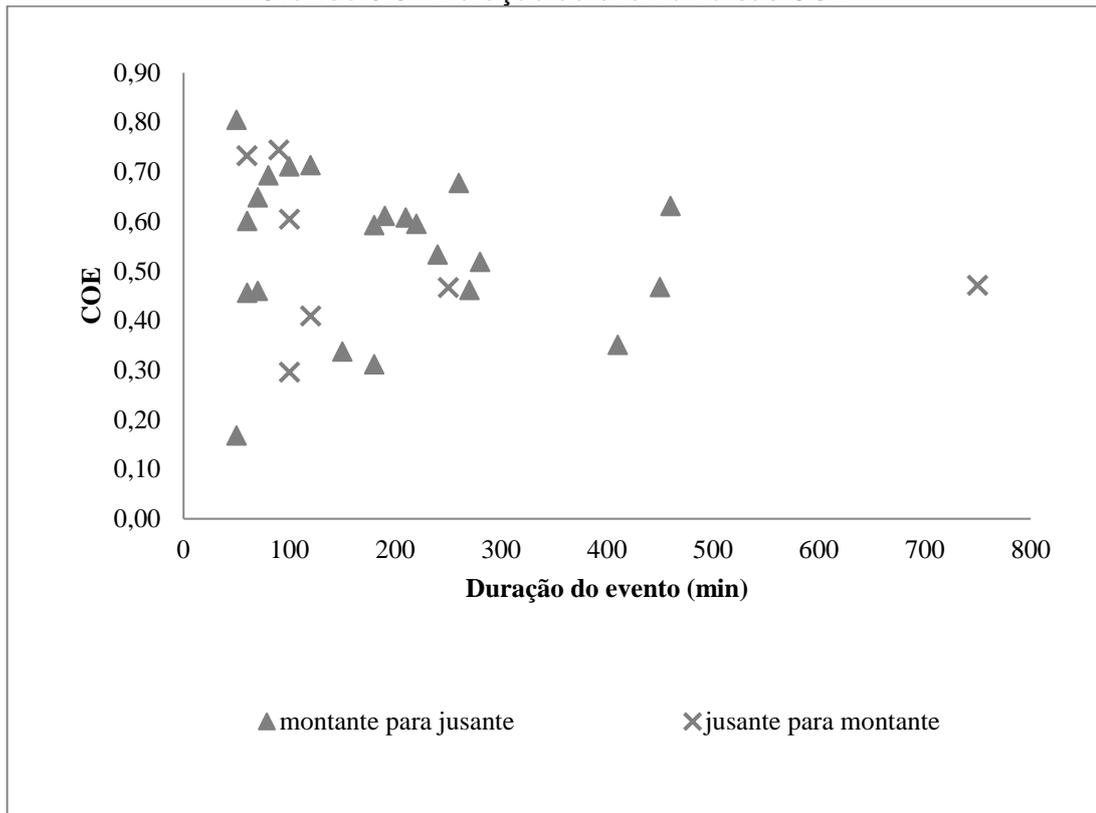
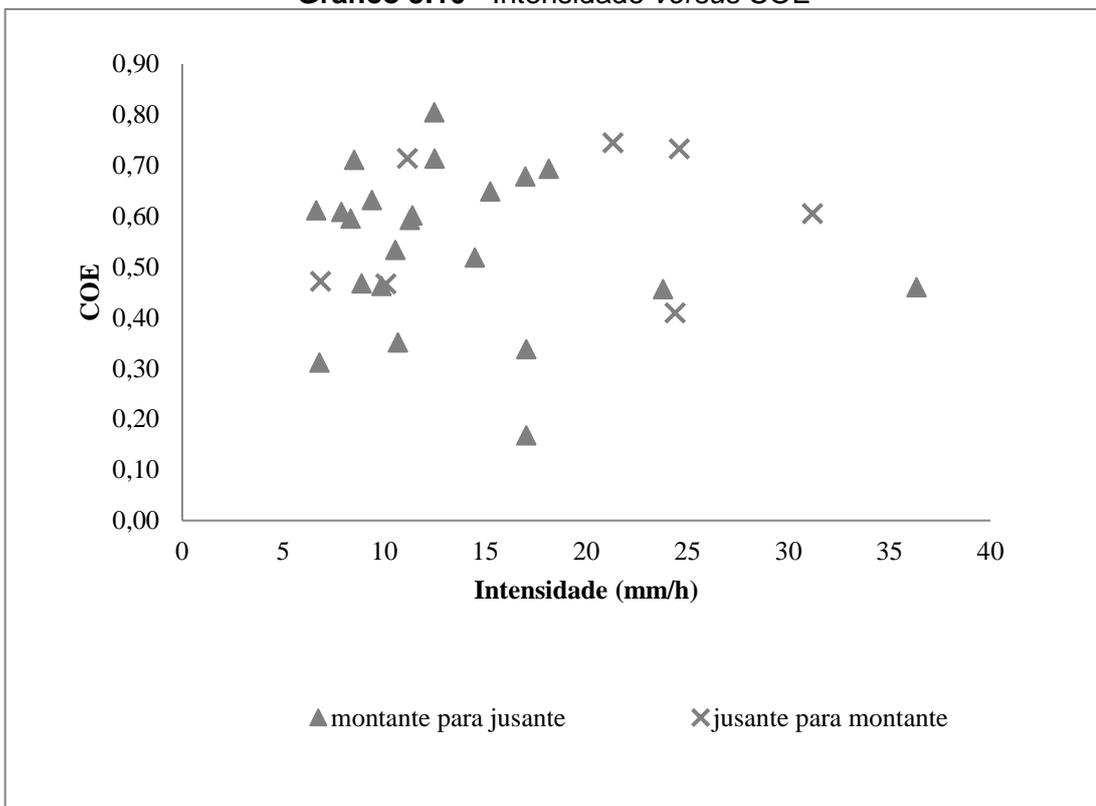
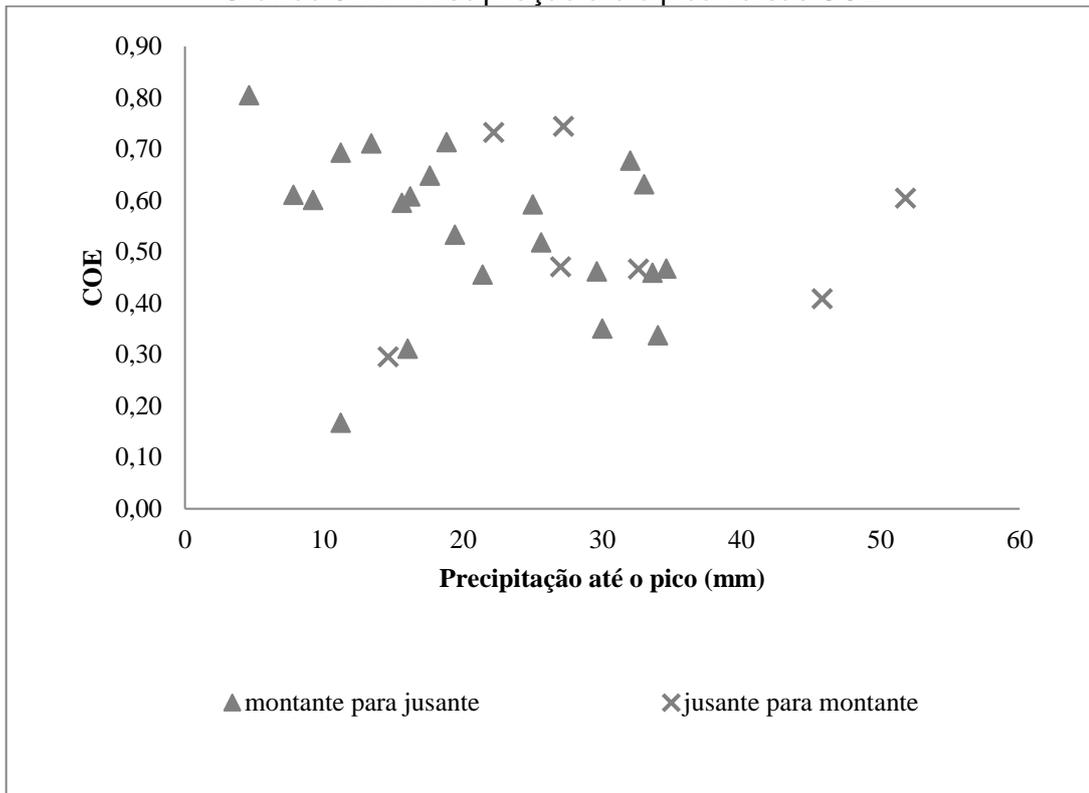
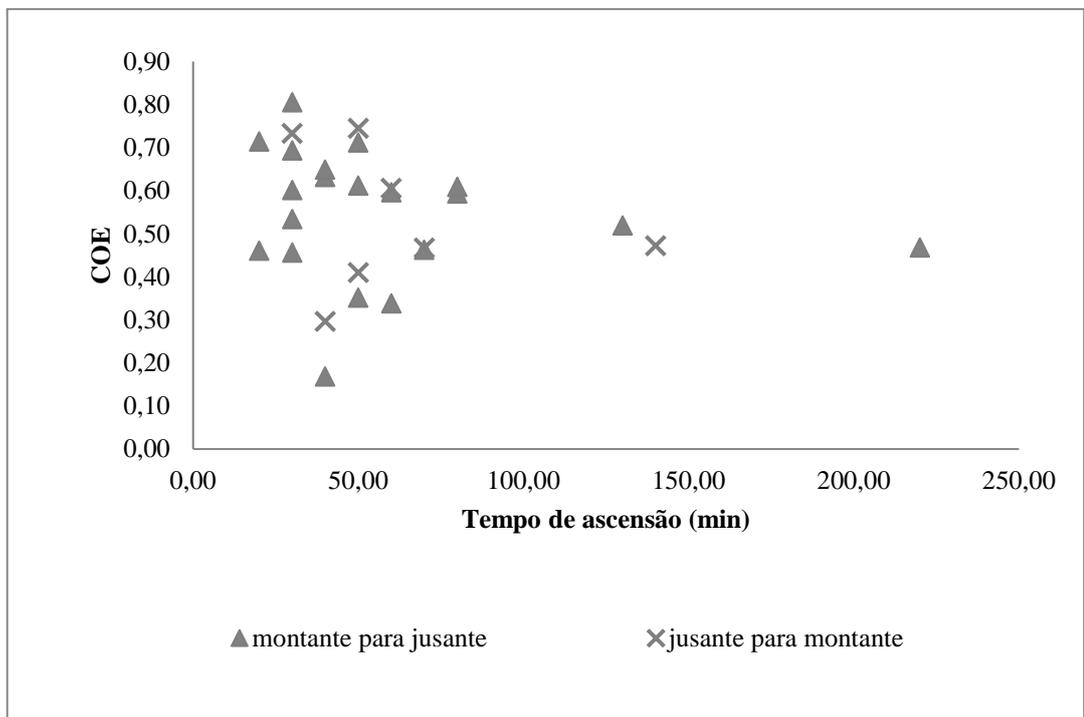
Gráfico 5.9 - Duração do evento versus COE**Gráfico 5.10 - Intensidade versus COE**

Gráfico 5.11 - Precipitação até o pico *versus* COE**Gráfico 5.12 - Tempo de ascensão *versus* COE**

Conforme pode ser observado, nos Gráficos de 5.7 a 5.12 também não foi possível encontrar nenhuma correlação entre as características analisadas e o COE dos eventos, incluindo a direção dos eventos. Esses resultados subsidiaram a escolha dos eventos para as análises posteriores.

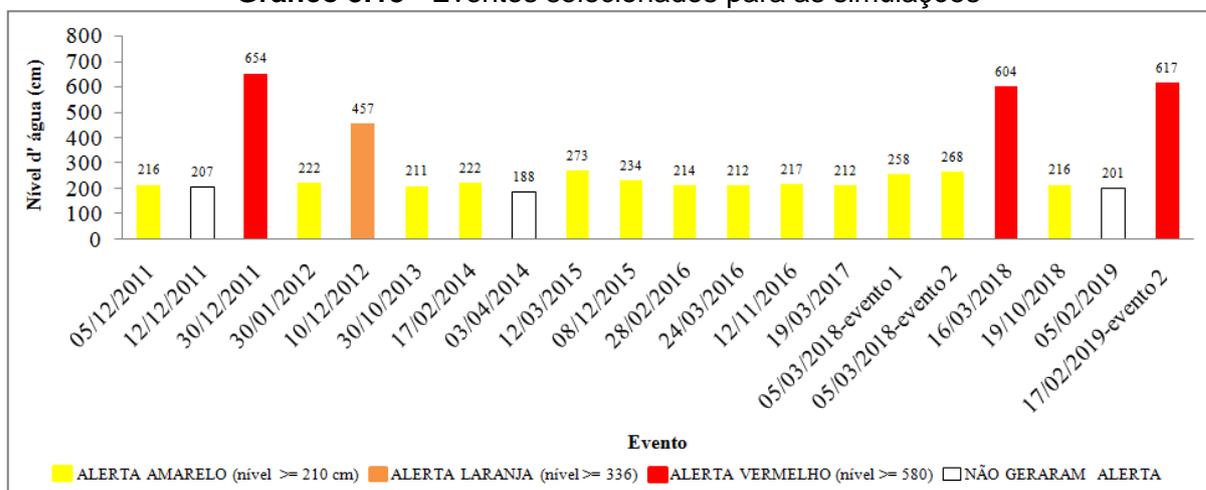
As características da Tabela 5.5 foram correlacionadas entre si, com objetivo encontrar um grupo de eventos que representasse determinado tipo de alerta, com características semelhantes. Entretanto, não foram encontradas correlações, optou-se por definir faixas das características que contemplam a maior parte dos eventos que emitiram alertas, apresentadas na sequência:

- Nível d'água máximo: 210 a 250 cm;
- Precipitação total: 10,4 a 45 mm;
- Duração total: 50 a 210 min;
- Intensidade da precipitação: 6,63 a 20 mm/h;
- Precipitação até o pico: 4,6 a 30 mm;
- Tempo de ascensão: 20 a 50 min;
- Coeficiente de *Nash* e *Sutcliffe*: 0,17 a 0,7.

5.3.3 Eventos selecionados para as próximas simulações no modelo

Os critérios de escolha dos eventos foram descritos no item 4.4.4. O Gráfico 5.13, mostra os eventos selecionados para simulações no modelo com os respectivos níveis d'água observados.

Gráfico 5.13 - Eventos selecionados para as simulações



Conforme pode ser observado no Gráfico 5.13, foram escolhidos 3 eventos que emitiram alertas vermelhos, 3 eventos que não emitiram alertas, 1 evento que emitiu alerta laranja e 13 eventos que emitiram alertas amarelos, utilizados na calibração dos parâmetros do modelo. Portanto, foram selecionados 20 eventos para as análises seguintes. A Tabela 5.6 mostra as características desses eventos selecionados.

Tabela 5.6 - Características dos eventos utilizados na geração de eventos sintéticos

Data	NA max (cm)	Pt (mm)	Dt (min)	i (mm/h)	Pp (mm)	ta (min)	COE
05/12/2011	216,00	32,00	90,00	21,33	27,20	50,00	0,74
12/12/2011	207,00	30,40	110,00	16,58	25,60	40,00	0,77
30/12/2011	654,00	97,80	140,00	41,91	40,60	50,00	0,35
30/01/2012	222,00	24,20	80,00	18,15	11,20	30,00	0,69
10/12/2012	457,00	52,00	100,00	31,20	51,80	60,00	0,61
30/10/2013	211,00	11,40	60,00	11,40	9,20	30,00	0,60
17/02/2014	222,00	67,60	280,00	14,49	25,60	130,00	0,52
03/04/2014	188,00	24,00	140,00	10,29	13,40	30,00	0,44
12/03/2015	273,00	24,60	60,00	24,60	22,20	30,00	0,73
08/12/2015	234,00	20,40	180,00	6,80	16,00	20,00	0,31
28/02/2016	214,00	48,80	120,00	24,40	45,80	50,00	0,41
24/03/2016	212,00	25,00	120,00	12,50	18,80	50,00	0,71
12/11/2016	217,00	18,60	100,00	11,16	14,60	40,00	0,30
19/03/2017	212,00	44,40	270,00	9,87	29,60	80,00	0,46
05/03/2018 - evento 1	258,00	42,60	150,00	17,04	34,00	50,00	0,34
05/03/2018 - evento 2	268,00	23,80	60,00	23,80	21,40	20,00	0,46
16/03/2018	604,00	26,20	200,00	7,86	19,60	50,00	0,22
19/10/2018	216,00	14,20	100,00	8,52	13,40	60,00	0,71
05/02/2019	201,00	20,80	80,00	15,60	18,00	40,00	-0,16
17/02/2019 - evento 2	617,00	46,80	280,00	10,03	38,80	90,00	0,45

Nota: NA max: nível d'água máximo; Pt: precipitação total; Dt: duração total; i: intensidade da precipitação; Pp: precipitação até o pico; ta: tempo de ascensão; COE: Coeficiente de *Nash e Sutcliffe*.

Conforme a Tabela 5.6 para os 20 eventos utilizados nas simulações, não foi possível definir um grupo de eventos com características semelhantes, mas foi possível definir as faixas das características que contempla a maior parte dos eventos:

- Nível d'água máximo: 188 a 280 cm;
- Precipitação total: 11,40 a 45 mm;
- Duração total: 60 a 150 min;
- Intensidade da precipitação: 6,80 a 25 mm/h;
- Precipitação até o pico: 9,20 a 30 mm;
- Tempo de ascensão: 20 a 50 min;
- Coeficiente de *Nash e Sutcliffe*: -0,16 a 0,7.

5.4 Simulação dos eventos, observados e sintéticos, e análise geral dos resultados

A Tabela 5.7 mostra os ângulos calculados (ver item 3.8), o coeficiente de determinação correspondente a cada ângulo do evento e os sentidos encontrados para os 20 eventos escolhidos para realização das simulações. Os sentidos dos eventos são os geográficos.

Tabela 5.7 - Ângulos, Coeficientes de Determinação e sentido dos eventos

Eventos de simulação no SWMM	Ângulo do evento observado (°)	Coeficiente de determinação do ângulo	Sentido do evento observado
05/12/2011	58	0,45	Sudoeste para nordeste
12/12/2011	9	0,26	Sul para norte
30/12/2011	-70	0,23	Leste para oeste
30/01/2012	-90	0,42	Leste para oeste
10/12/2012	16	0,64	Norte para sul
30/10/2013	82	0,96	Oeste para leste
17/02/2014	74	0,55	Leste para oeste
03/04/2014	-79	0,03	Oeste para leste
12/03/2015	-62	0,83	Noroeste para sudeste
08/12/2015	-84	0,56	Leste para oeste
28/02/2016	86	0,04	Oeste para leste
24/03/2016	-66	0,21	Sudoeste para nordeste
12/11/2016	-62	0,11	Sudeste para noroeste
19/03/2017	22	0,91	Sul para norte
05/03/2018-evento 1	-13	0,66	Sul para norte
05/03/2018-evento 2	-38	0,56	Sudeste para noroeste
16/03/2018	29	0,25	Sudoeste para nordeste
19/10/2018	89	0,71	Oeste para leste
05/02/2019	-70	0,71	Sudeste para noroeste
17/02/2019-evento 2	26	0,65	Nordeste para sudoeste

De acordo com os resultados demonstrados na Tabela 5.7, 11 eventos tiveram o coeficiente de determinação acima de 0,5, e 9 eventos tiveram coeficiente de determinação abaixo de 0,5. Outros estudos semelhantes, de determinação do ângulo dos eventos, que foram abordados nessa pesquisa (item 3.8) não definiram o coeficiente de determinação do ângulo.

Quando o coeficiente de determinação é próximo de 1 significa que o valor encontrado do ângulo foi melhor estimado, valores perto de 0 denotam um maior erro relacionado a estimativa desses ângulos (NAGHETTINI e PINTO, 2007). Por conseguinte, nessa pesquisa foram encontrados alguns valores de coeficiente de determinação mais próximos de zero, porém,

mesmo assim esses eventos foram utilizados, de forma a considerar um grupo maior de eventos observados a serem utilizados nas simulações no modelo.

Na Tabela 5.7 também é possível verificar o sentido das precipitações, que foi avaliado visualmente a partir dos mapas dos campos de chuva de cada evento. Observa-se que os eventos provenientes do norte/nordeste/noroeste são menos frequentes. É importante observar que a bacia está orientada de sudoeste para nordeste, exercendo possivelmente uma forte influência na direção preferencial dos eventos, sendo que a maior parte vem de montante para jusante da bacia.

Os parágrafos a seguir demonstram os resultados das simulações dos eventos sintéticos. A título de exemplo, os campos de chuva do evento do dia 05/03/2018 - evento 2 são mostrados, esse foi o mesmo evento exemplificado na metodologia (item 4.4.4) onde aqui mostra os resultados das rotações consideradas em cada espaço de tempo. Para esse evento, o ângulo encontrado foi de -38° . O sinal indica a direção do giro, portanto, para direcionar o evento até o ângulo de 360° ou 0° , o campo de chuva foi girado em -38° ($38^\circ - 38^\circ = 0^\circ$ ou 360°), estando posicionado no sentido sul-norte.

Logo após, ao chegar no ponto de 360° , o campo de chuva era então rotacionado a 90° no sentido oeste-leste, 180° no sentido norte-sul e 270° no sentido leste-oeste, respectivamente. As Figuras 5.3 a 5.6 mostram as rotações dos eventos, 360° , 90° , 180° e 270° , respectivamente, para cada passo de tempo.

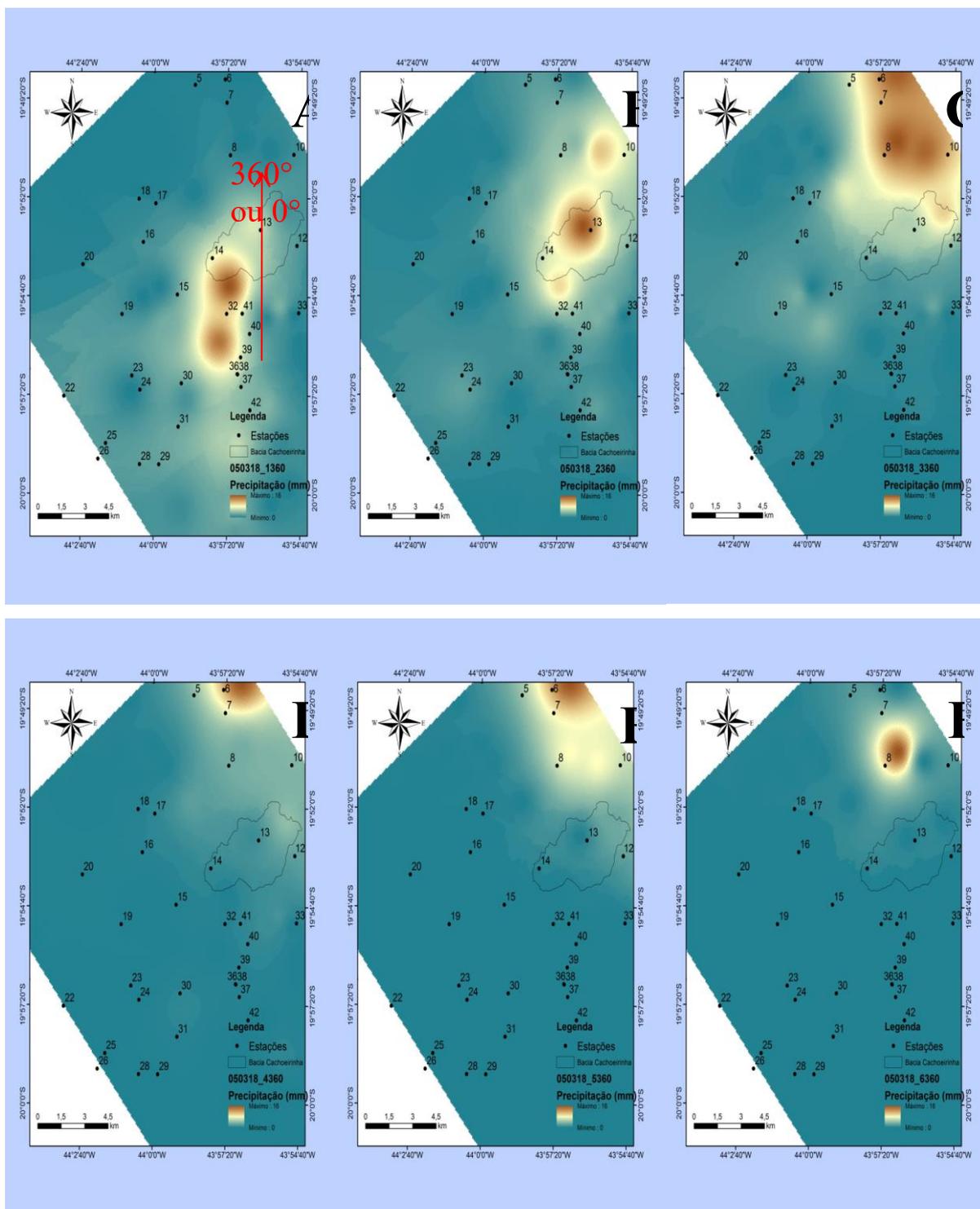


Figura 5.3 - (A) Evento 05/03/18 10 min - 360°; (B) Evento 05/03/18 20 min - 360°; (C) Evento 05/03/18 30 min - 360°; (D) Evento 05/03/18 40 min - 360°; (E) Evento 05/03/18 50 min - 360°; (F) Evento 05/03/18 60 min - 360°

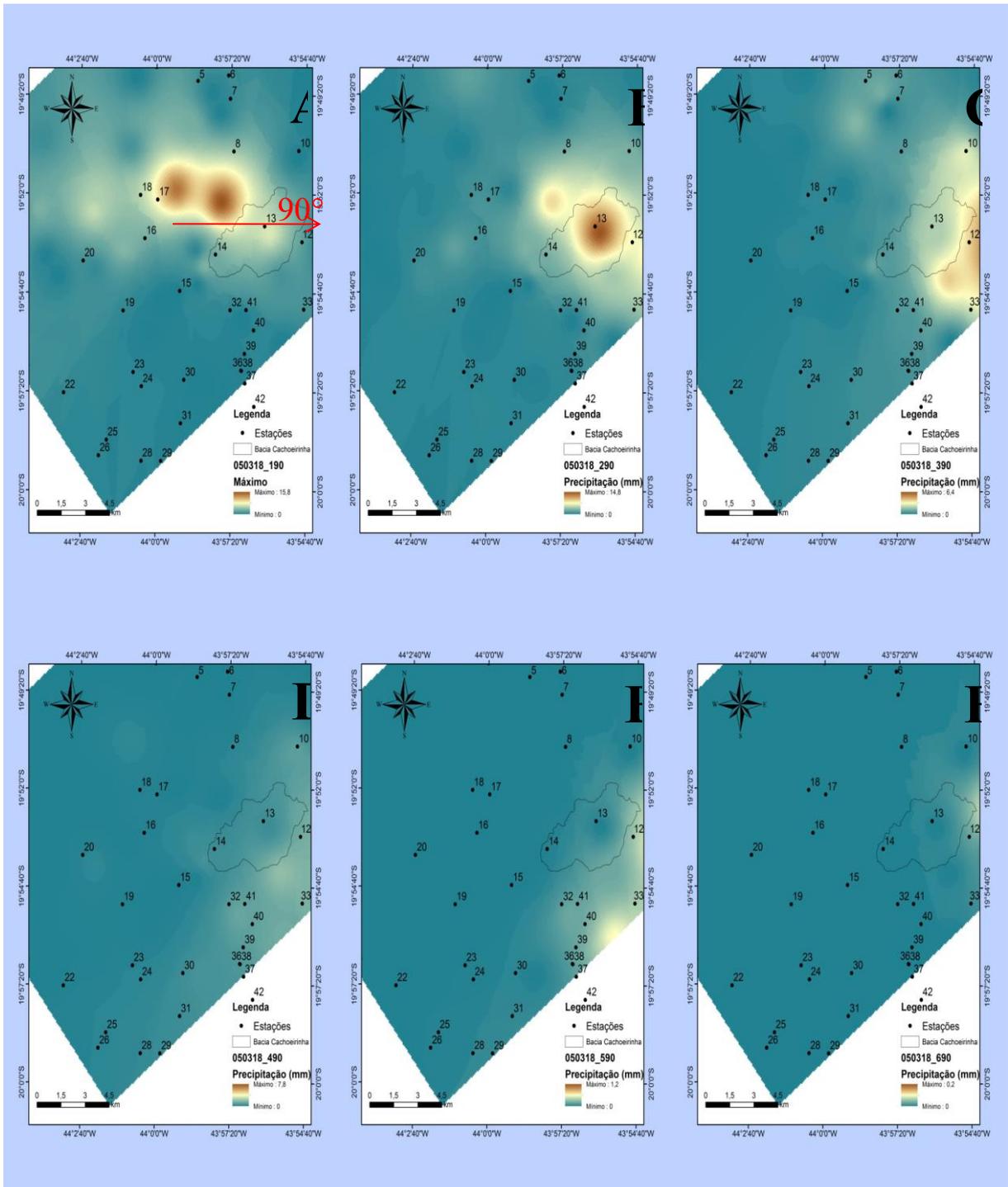


Figura 5.4 - (A) Evento 05/03/18 10 min - 90°; (B) Evento 05/03/18 20 min - 90°; (C) Evento 05/03/18 30 min - 90°; (D) Evento 05/03/18 40 min - 90°; (E) Evento 05/03/18 50 min - 90°; (F) Evento 05/03/18 60 min - 90°

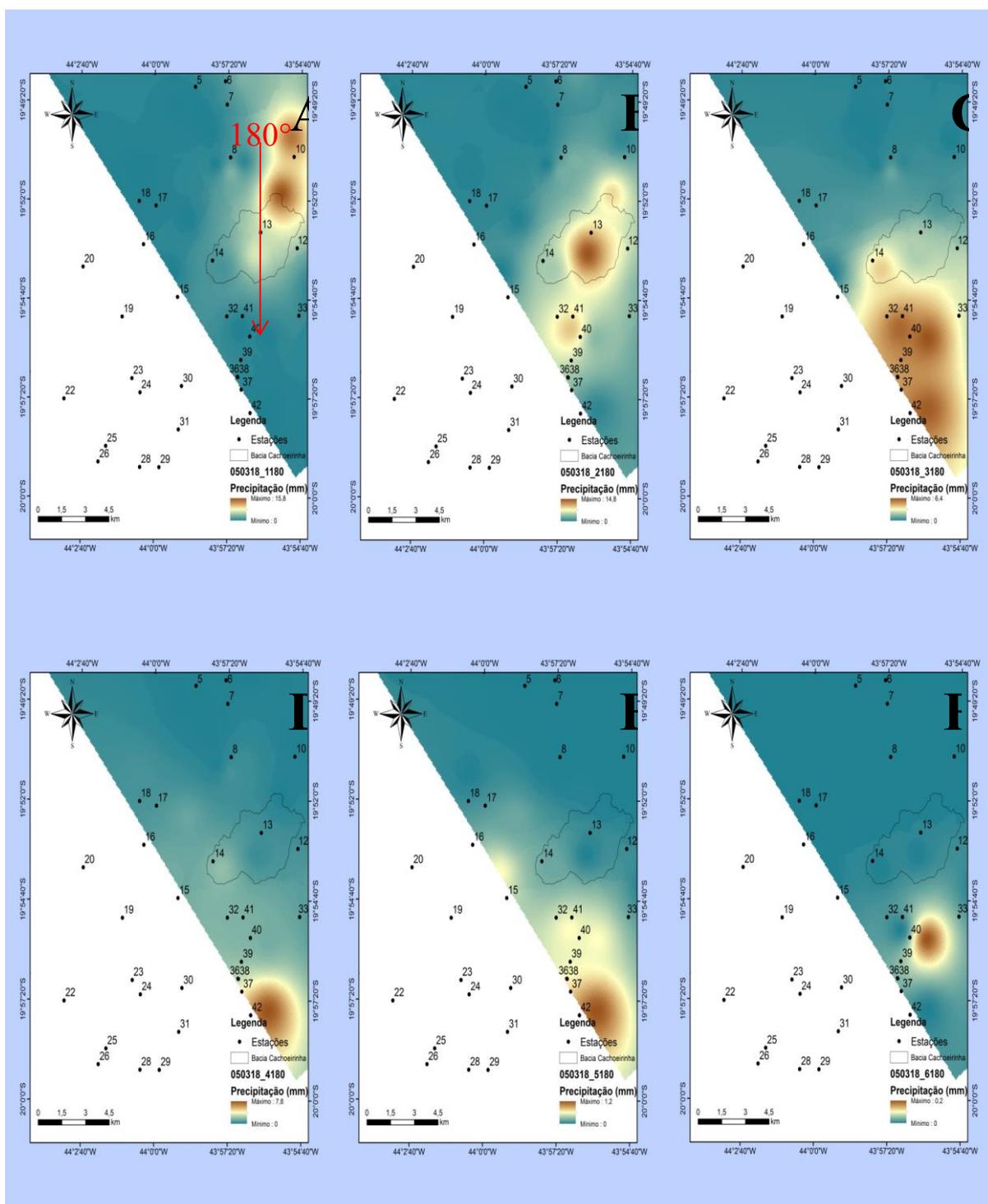


Figura 5.5 - (A) Evento 05/03/18 10 min - 180°; (B) Evento 05/03/18 20 min - 180°; (C) Evento 05/03/18 30 min - 180°; (D) Evento 05/03/18 40 min - 180°; (E) Evento 05/03/18 50 min - 180°; (F) Evento 05/03/18 60 min - 180°

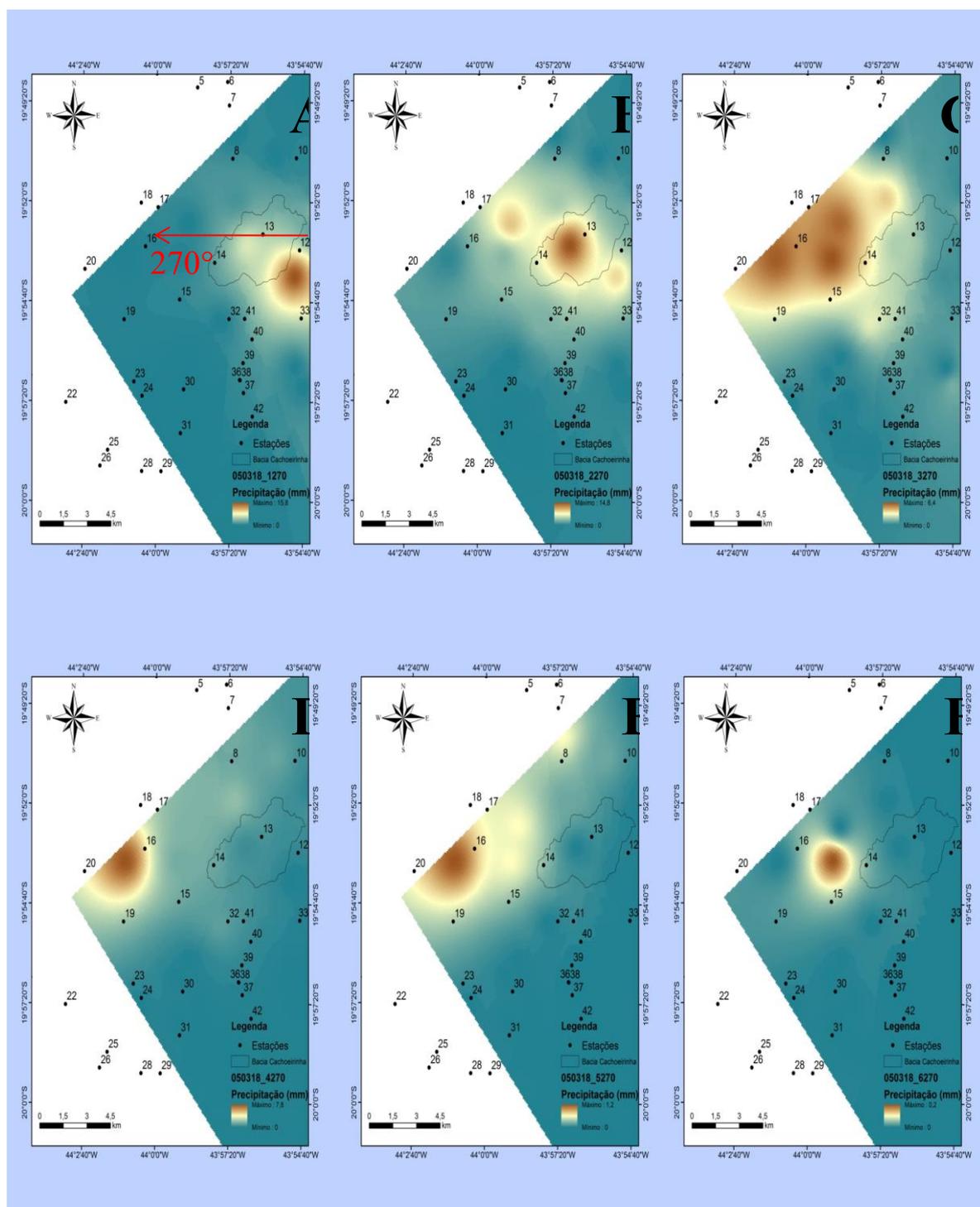
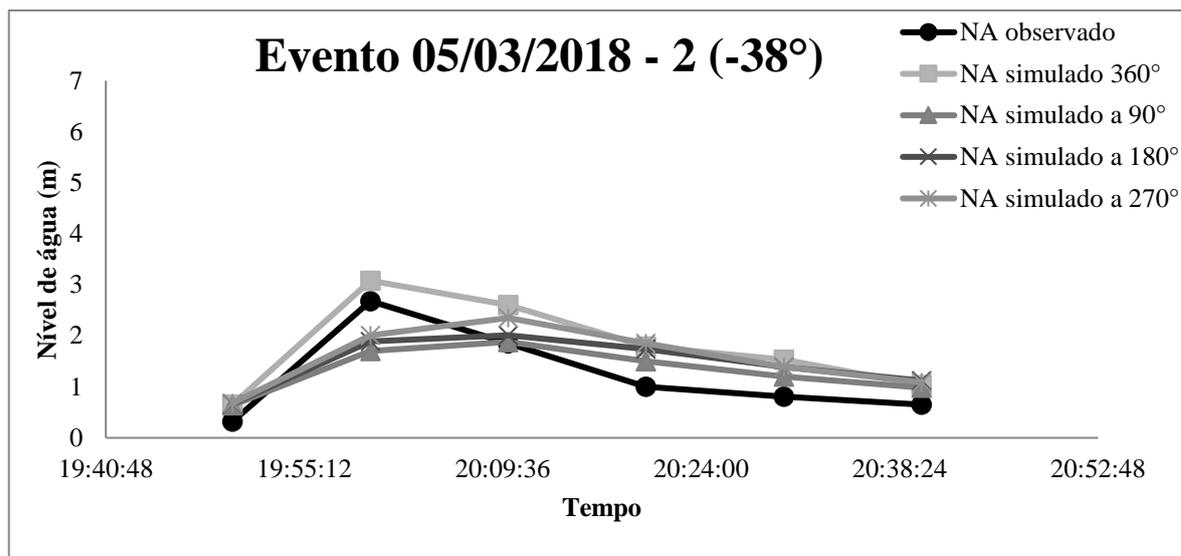


Figura 5.6 - (A) Evento 05/03/18 10 min - 270°; (B) Evento 05/03/18 20 min - 270°; (C) Evento 05/03/18 30 min - 270°; (D) Evento 05/03/18 40 min - 270°; (E) Evento 05/03/18 50 min - 270°; (F) Evento 05/03/18 60 min - 270°

Para exemplificar os resultados da modelagem no SWMM, foi escolhido o evento sintético 05/03/2018 - evento 2, nas diversas direções analisadas (Gráfico 5.14).

Gráfico 5.14 - Simulação do evento 05/03/2018 - evento 2



De acordo com o Gráfico 5.14, foi possível observar que a mudança de direção do evento de chuva afeta a resposta hidrológica da bacia. O ângulo de 360°, no sentido sul-norte, foi o que obteve o nível de água mais elevado em relação aos demais. A mudança no sentido da precipitação acarreta em pequenas alterações com relação ao nível d'água de pico, mas modifica o tempo ao pico, o restante dos eventos têm um comportamento similar (ver APÊNDICE 3).

De acordo com a revisão de literatura do item 3.2, outros estudos que também concluíram que o tempo ao pico é o fator mais influenciado nas simulações dos eventos de elevada magnitude com diferentes padrões espaço temporais de precipitação, na simulação do escoamento superficial, foram: Nicótina *et al.*, (2008); Zoccatelli *et al.* (2010); Zoccatelli *et al.* (2011); Garambois *et al.* (2014); Bruni *et al.*(2015); Ochoa-Rodriguez *et al.* (2015); Emmanuel *et al.* (2015); Silvestro *et al.* (2016) e Gilewski e Nawalany (2018).

Para os eventos que geraram alertas vermelhos selecionados para simulação, a direção com maior nível de água simulado foi a mesma do evento observado. A seguir será apresentada uma avaliação geral englobando os 20 eventos da simulação. Os Gráficos de 5.15 a 5.18 apresentam os resultados das simulações feitas para os eventos sintéticos na rotação de 360°, 90°, 180° e 270°, respectivamente.

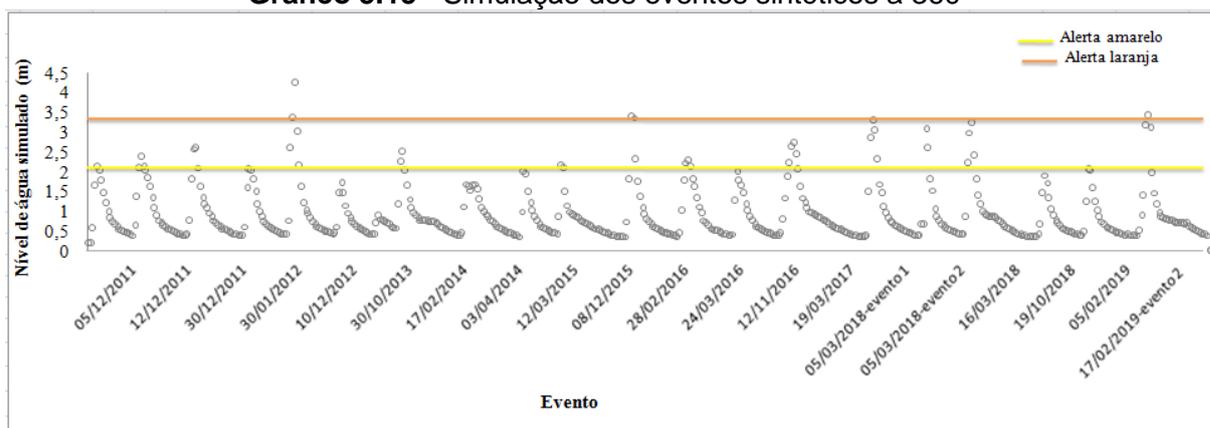
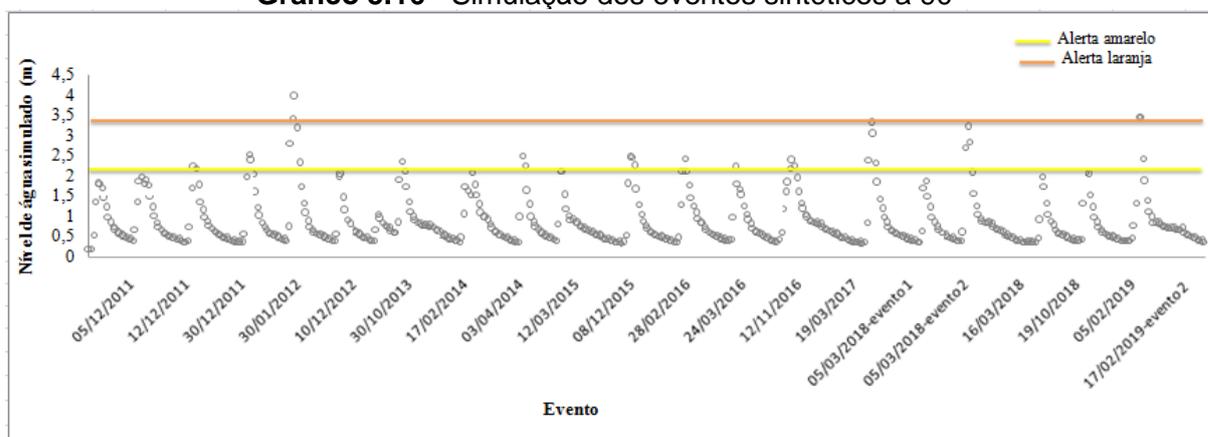
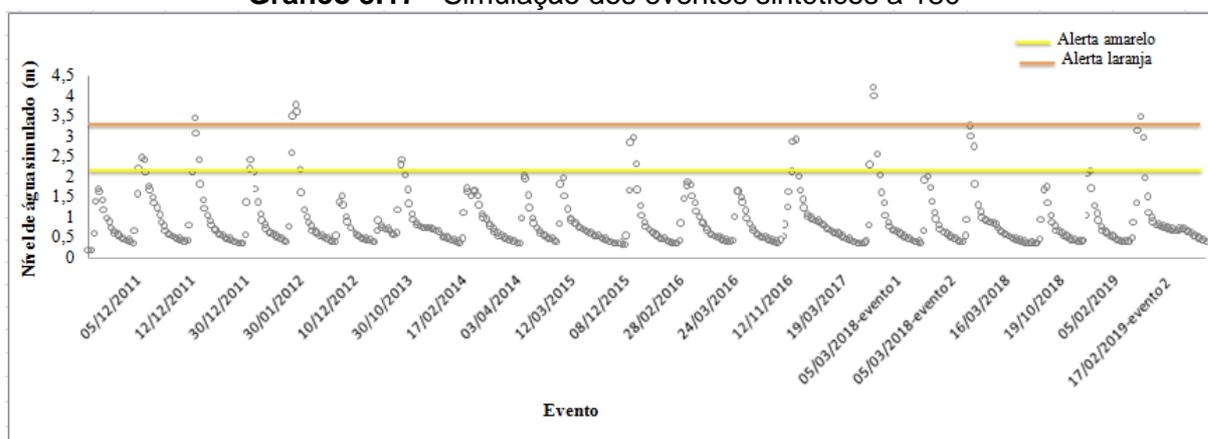
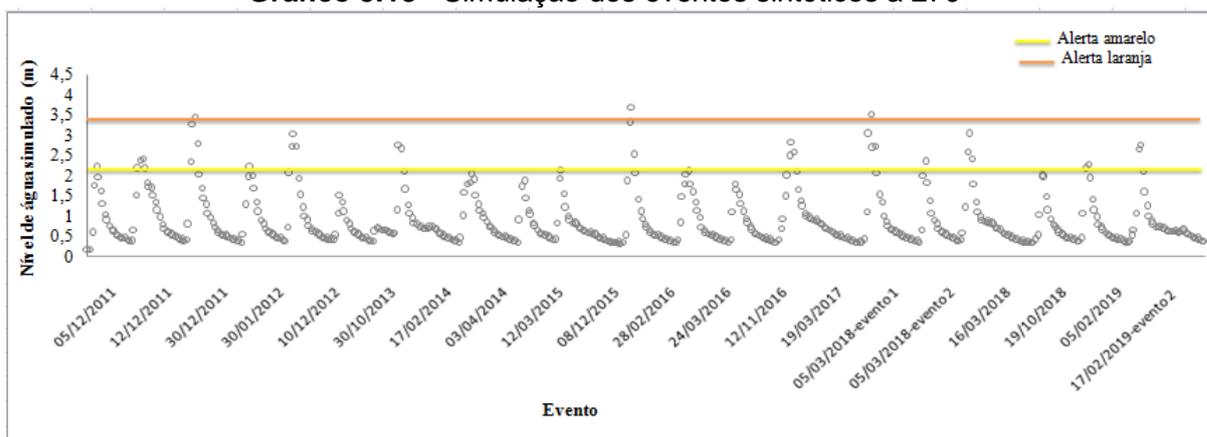
Gráfico 5.15 - Simulação dos eventos sintéticos a 360°**Gráfico 5.16 - Simulação dos eventos sintéticos a 90°****Gráfico 5.17 - Simulação dos eventos sintéticos a 180°**

Gráfico 5.18 - Simulação dos eventos sintéticos a 270°

Com base nos resultados dos Gráficos 5.15 a 5.18, dos eventos sintéticos criados, foram gerados apenas alertas amarelos e laranjas. O ângulo com os níveis de água mais elevados foi o de 180° no sentido norte-sul, registrando alertas laranjas.

A Tabela 5.8 faz um resumo geral dos percentuais de alertas gerados nas simulações realizadas para cada ângulo analisado. As porcentagens na tabela foram determinadas com base nos eventos simulados, que contabilizam um total de 20 eventos.

Tabela 5.8 - Resumo dos resultados da simulação – percentual de eventos que apresentaram alerta (%), por tipo de alerta

Ângulo do evento	Alerta vermelho	Alerta laranja	Alerta amarelo	Não emitiu alerta
360°	0	15	55	30
90°	0	10	65	25
180°	0	20	35	45
270°	0	15	60	25

Com relação a Tabela 5.8, pode-se inferir que os alertas laranjas são menos frequentes no ângulo de 90°, no sentido oeste-leste, com uma porcentagem de 10% de ocorrência e mais frequentes no ângulo de 180°, no sentido norte-sul, com um percentual de 20%. Os alertas amarelos tiveram uma maior representação totalizando 65%, para o ângulo de 90°, no sentido oeste-leste. O sentido preferencial com maior ocorrência de eventos que não geraram alertas foi o de 180°,

na direção norte-sul. Sendo assim, os ângulos de 90°, no sentido oeste-leste, e 270°, no sentido leste-oeste, foram os com menos eventos que não geraram alertas.

A Tabela 5.9 mostra os eventos observados utilizados nas simulações, os resultados dos alertas simulados e alertas sintéticos, criados com as rotações de 360°, 90°, 180° e 270°, respectivamente.

Tabela 5.9 - Avaliação geral dos alertas

Eventos	Alerta observado	Alerta simulado	Alerta sintético 360°	Alerta sintético 90°	Alerta sintético 180°	Alerta sintético 270°
05/12/2011						
12/12/2011						
30/12/2011						
30/01/2012						
10/12/2012						
30/10/2013						
17/02/2014						
03/04/2014						
12/03/2015						
08/12/2015						
28/02/2016						
24/03/2016						
12/11/2016						
19/03/2017						
05/03/2018- evento 1						
05/03/2018- evento 2						
16/03/2018						
19/10/2018						
05/02/2019						
17/02/2019- evento 2						

Com os resultados da Tabela 5.9, observou-se que as simulações feitas para os alertas simulados, apontam que o modelo não consegue representar bem os alertas vermelhos, característicos pelo extravasamento no canal, não se sabe ao certo porque isso ocorre, uma possível hipótese seria o fato do modelo não conseguir representar bem a rugosidade do canal, quando o NA aumenta muito. As vigas do canal não são representadas no modelo.

Os alertas vermelhos são identificados pelo modelo como sendo amarelos. Com relação ao evento que emitiu um alerta laranja, o modelo conseguiu representar o mesmo. Já para os

eventos que não emitiram nenhum alerta, mas tinham um total precipitado elevado, o modelo identificou como se tivessem emitido um alerta amarelo.

Para os eventos sintéticos criados nenhum alerta vermelho foi identificado, portanto, surgem duas hipóteses principais: i) os eventos sintéticos de fato não formariam alertas vermelhos ou ii) o modelo não conseguiu representar o alerta vermelho para esses eventos. Por conseguinte, ao analisar a série de eventos sintéticos foi possível concluir que os eventos em diferentes direções no espaço-tempo afeta a resposta hidrológica da bacia, emitindo alertas distintos nas direções analisadas.

Com relação às características dos linigramas, que podem ser vistos no APÊNDICE 3. Os tempos de pico dos eventos sintéticos variam conforme o sentido do deslocamento do campo de chuva, e essa variação é menor quando o sentido e direção dos eventos sintéticos são parecidos com aqueles dos eventos reais. De maneira geral, características como tempos de ascensão, tempos de recessão, e nível d'água são sensíveis a pequenas variações nos sentidos de deslocamento do campo de chuva, isso era esperado e condiz com a literatura (item 3.2).

Portanto, de acordo com os resultados obtidos, conclui-se que vale a pena o desenvolvimento de novas pesquisas, com intuito de compreender a variabilidade espacial e temporal das precipitações e suas influências na resposta hidrológica da bacia, esse estudo tem potencial para gerar melhorias na emissão dos alertas. Uma forma de impulsionar esses estudos seria ampliar a quantidade dos eventos observados utilizados para execução das simulações no modelo e estudar os eventos em outras distribuições no espaço-tempo.

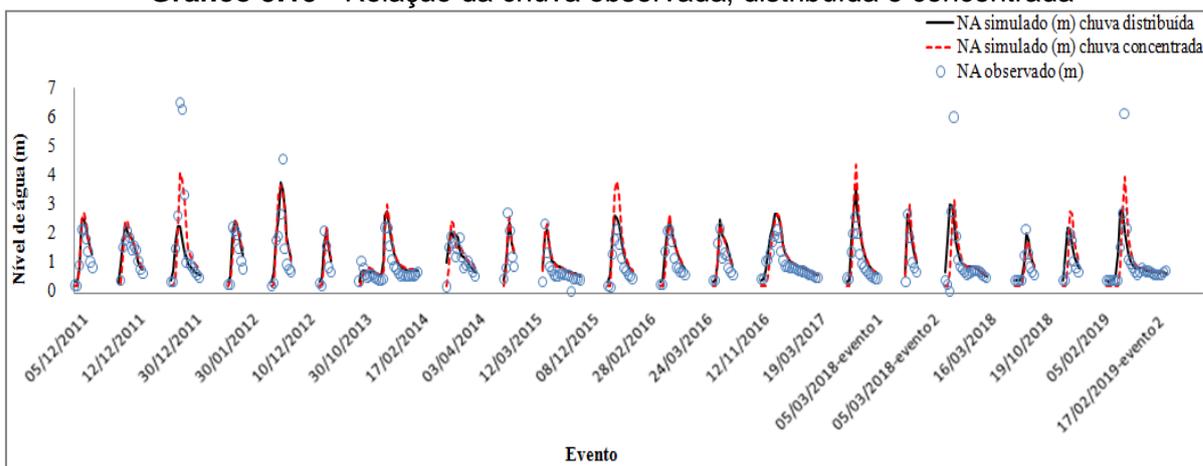
5.5 Simulação da chuva concentrada e distribuída

A Tabela 5.10 apresenta os eventos observados selecionados (ver Tabela 5.2) para execução desse objetivo, além disso ela apresenta os alertas desses eventos, os resultados dos alertas gerados para chuva distribuída, tendo um pluviômetro em cada sub-bacia (ver Figura 4.11) e os resultados da chuva concentrada em um único pluviômetro para toda a bacia (ver Figura 4.12).

Tabela 5.10 - Comparação entre os alertas gerados para chuva observada, distribuída e concentrada. A cor de fundo representa o alerta correspondente e o valor mostrado na tabela é o do COE para cada simulação

Eventos	Chuva observada	Chuva distribuída	Chuva concentrada
05/12/2011		0,74	0,68
12/12/2011		0,77	0,78
30/12/2011		0,35	0,79
30/01/2012		0,69	0,50
10/12/2012		0,61	0,59
30/10/2013		0,60	0,30
17/02/2014		0,52	0,48
03/04/2014		0,44	0,41
12/03/2015		0,73	0,78
08/12/2015		0,31	0,54
28/02/2016		0,41	-1,13
24/03/2016		0,71	0,54
12/11/2016		0,30	0,35
19/03/2017		0,46	0,38
05/03/2018-evento 1		0,34	-0,50
05/03/2018-evento 2		0,68	0,26
16/03/2018		0,22	0,68
19/10/2018		0,28	0,61
05/02/2019		-0,16	0,11
17/02/2019-evento 2		0,45	0,80

Conforme os resultados da Tabela 5.10, ao comparar os níveis d'água da chuva observada com os obtidos nas simulações da chuva distribuída e concentrada, observou-se no geral que a chuva distribuída obteve uma representação mais correta, com relação à representação dos alertas, com exceção dos alertas vermelhos, na análise do COE, onde a chuva concentrada obteve melhores resultados. O Gráfico 5.19, mostra os níveis d'água observados e simulados, com precipitação concentrada e distribuída, para cada evento.

Gráfico 5.19 - Relação da chuva observada, distribuída e concentrada

De acordo com o Gráfico 5.19, com relação ao monitoramento visual dos níveis de pico a chuva distribuída no geral tem uma melhor representação dos níveis d'água observados. A chuva concentrada, para alguns eventos, superestimou o pico da chuva, 08/12/2015 e 05/03/2018 - evento 1.

Siqueira, Moura e Silva (2019), consideram em sua pesquisa a chuva de forma concentrada. Nessa pesquisa considerou-se a chuva de forma distribuída. Portanto, foi proposta uma comparação para verificar qual configuração obtinha no geral os melhores resultados nas simulações.

Por escolha metodológica, foi considerado o modelo calibrado utilizando a chuva distribuída, não se sabe ao certo, mais acredita-se que considerar a chuva de forma distribuída na calibração não teve muita interferência nos resultados dessa análise.

Ao comparar o modelo utilizando a chuva distribuída com a chuva concentrada, tanto na avaliação do COE quanto no monitoramento visual dos níveis de pico a chuva distribuída obteve no geral melhores resultados, estando em conformidade com a literatura.

Os autores Wilson, Valdes e Rodriguez-Iturbe (1979) e Emmanuel *et al.* (2016) também concluíram que o modelo sendo representado utilizando a chuva de forma distribuída se comparada a chuva concentrada, proporciona melhores resultados na simulação do escoamento superficial dos eventos de elevada magnitude. Para alguns eventos observou-se tanto em relação ao COE como no monitoramento visual dos nível de pico que a chuva concentrada e distribuída tiveram resultados próximos. Conforme Emmanuel *et al.* (2015) para precipitações com menor

variabilidade espacial as diferenças entre os hidrogramas adotados considerando a chuva distribuída e concentrada são pequenas.

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No tópico 6.1 estão apresentadas todas as conclusões feitas nessa pesquisa e incertezas dos procedimentos adotados. Já no tópico 6.2 são feitas recomendações para trabalhos futuros nessa linha de pesquisa.

6.1 Conclusões

Através do trabalho realizado foi possível constatar que, modificando o mesmo evento de chuva de maneiras distintas no espaço-tempo, existe influência da distribuição espacial e temporal na resposta hidrológica da bacia do Cachoeirinha, emitindo alertas distintos nas direções analisadas. A mudança no sentido da precipitação modifica principalmente o tempo ao pico dos eventos analisados.

Com relação aos resultados obtidos na calibração dos parâmetros do modelo, através do cálculo do COE e do monitoramento visual dos níveis de pico, observou-se que o modelo foi adequado para representar os níveis d'água observados com a chuva distribuída, por sub-bacia.

Ainda com relação ao modelo, observou-se que o mesmo não consegue identificar os alertas vermelhos, subestimando os níveis d'água para os eventos que o canal extravasa, não sendo capaz de identificar extravazão do canal, uma possível explicação seria o fato do modelo não conseguir representar bem a rugosidade do canal, quando o NA aumenta muito. Portanto, uma provável causa dessa interferência na representação da rugosidade seria o fato das vigas do canal não serem representadas.

Já para os alertas amarelos e laranja, o modelo tem uma satisfatória representação. Para dias em que não se observou a ocorrência de alerta, mas o nível d'água foi elevado, o modelo representa os alertas como alerta amarelo, ou seja, superestima os níveis d'água. No geral, o modelo utilizado pode ser considerado sensível para identificar as mudanças espaciais das direções e sentidos das precipitações abordadas nessa pesquisa.

Para os 20 eventos utilizados nas simulações, não foi possível definir um grupo de eventos com características semelhantes, estipulando apenas faixas de variação em termos de nível d'água máximo, precipitação total, duração total, intensidade da precipitação, precipitação até o pico, tempo de ascensão e coeficiente de *Nash e Sutcliffe*.

Ao se analisar as direções e sentidos das precipitações observadas que geraram alerta na bacia, a direção mais recorrente observada foi de montante para jusante da bacia. De maneira geral, as precipitações provenientes do norte/nordeste/noroeste são menos frequentes, portanto, tem menos chance de gerar alerta na bacia.

Na avaliação do desempenho do modelo considerando a chuva distribuída espacialmente e concentrada em toda a bacia. A chuva distribuída obteve melhores resultados. Sendo assim, considerando a condição que os parâmetros do modelo foram calibrados utilizando a chuva de forma distribuída, trabalhar com a chuva distribuída, ao em vez de concentrada, representa melhor o que ocorre na realidade. Porém, devido ao maior trabalho de considerar o modelo utilizando a chuva distribuída, acredita-se que apenas em trabalhos científicos vale a pena esse esforço.

O trabalho de verificação da influência espacial e temporal da precipitação na resposta hidrológica da bacia de estudo é um passo inicial para que seja definido posteriormente uma direção preferencial de formação dos alertas, principalmente para os alertas vermelhos, característicos pelo transbordamento do canal, contribuindo para redução dos impactos de inundação gerados por esses eventos de elevada magnitude.

As incertezas constatadas durante toda a pesquisa foram:

- Existem improbabilidades relacionadas ao procedimento de modelagem na calibração dos parâmetros, sendo o modelo sensível para os parâmetros considerados.
- Outro ponto observado no decorrer do estudo, que gera incerteza seria em relação aos dados de nível d'água observados, onde foram constatados erros de leitura e registros incorretos de emissão de alerta.
- Existem incertezas sobre a definição dos ângulos da chuva dos eventos, pois foi observado, por meio do mapeamento da precipitação realizado, que alguns eventos formam diversos núcleos de chuva, o que dificulta a identificação da direção preferencial do evento formado.

6.2 Recomendações

Com a realização desse estudo, observou-se que existe influência da distribuição espacial e temporal da precipitação na resposta hidrológica da bacia. Com relação à direção preferencial de ocorrência dos alertas ainda devem ser feitas mais pesquisas, inclusive em outras bacias. Deste modo, foram feitas as seguintes recomendações:

- Testar outras metodologias para cálculo do ângulo de formação da chuva ou ainda verificar se os resultados podem ser diferentes se forem excluídos da análise os eventos que possuem vários núcleos de precipitação.
- Considerar a simulação de chuvas sintéticas com mesma duração e volume, de forma a criar cenários hipotéticos distintos, sobretudo aqueles que representem a precipitação deslocando-se na mesma direção da bacia, provenientes de montante para jusante ou de jusante para montante, para representar melhor os diversos tipos de chuva decorrentes no espaço-tempo.
- Fazer uma simulação considerando o modelo calibrado utilizando a chuva concentrada, para verificar se realmente a chuva distribuída têm melhores resultados, se comparada a concentrada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHRENS, B. Distance in spatial interpolation of daily rain gauge data. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, v. 2, n. 5, p. 1893–1922, 2005.

BAEK, S. S.; CHOI, D.; JUNG, J.; LEE, HJ.; LEE, H.; YOON, KS.; CHO, K. H. Optimizing low impact development (LID) for stormwater runoff treatment in urban. *Water Research*, v. 86, p. 122–131, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2015.08.038>>. Acessado: 06 de abril de 2019.

BARCO, J.; WONG, K. M.; MICHAEL, K. S. Automatic Calibration of the U . S . EPA SWMM Model for a Large Urban Catchment. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 134, n. 4, p. 466–474, 2008.

BELING, F. A.; PAIVA, E. M. C. D.; PAIVA, J. B. D. Análise De Sensibilidade Dos Parâmetros Do Modelo Swmm5 Na Geração De Escoamento Superficial. *Publicado nos anais do XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, ABRH*, p. 1–8, 2013. Disponível em: <https://abrh.s3.saeast1.amazonaws.com/Sumarios/155/ed8dcf11baf03f8ad2d8e28a55e8fee4_a82af065c350da46cfae49abceb640b0.pdf>. Acessado: 05 de abril de 2019.

BERTONE, P.; MARINHO, C. Gestão de risco e resposta a desastres naturais: a visão do planejamento. In: *IV Congresso CONSAD de Gestão Pública. Brasília*, 2013.

BEVEN, K. J.; HOMBERGER, G. M.; Assessing the effect of spatial pattern of precipitation in modeling stream flow hydrographs. *Water Resources Bulletin - American Water Resources Association*, V. 18, p. 823-829, 1982.

BRUNI, G.; REINOSO, R.; VAN DE GIESEN, N. C.; CLEMENS, F. H. L. R.; TEN VELDHUIS, J. A. E. On the sensitivity of urban hydrodynamic modelling to rainfall spatial and temporal resolution. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 19, n. 2, p. 691–709, 2015.

CAMORANI, G.; CASTELLARIN, A.; BRATH, A. Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 30, n. 8–10, p. 561–574, 2005.

CARBONE, M.; GAROFALO, G.; TOMEI, G.; PIRO, P. Storm tracking based on rain gauges for flooding control in urban areas. *Procedia Engineering*, v. 70, p. 256–265, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.02.029>>. Acessado: 02 de abril de 2019.

CHEN, FW; LIU, CW. Estimation of the spatial rainfall distribution using inverse distance weighting (IDW) in the middle of Taiwan. *Paddy Water Environ*, p. 209–222, 2012.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYNS, L. W. *Applied Hydrology*. Estados Unidos: McGraw-Hill International Editions, 1988.

COLLISCHONN, W. *Simulação Hidrológica de Grandes Bacias*. 2001. v. 6, n. 1, p. 95–118. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Ajuste multiobjetivo dos parâmetros de um modelo hidrológico. *Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, v. 2, n. 4, 1998.

CRISTIANO, E.; VELDHUIS, MC. T.; GIESEN, N. V. Spatial and temporal variability of rainfall and their effects on hydrological response in urban areas – a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, p. 3859–3878, 2017.

DAWDY, D. R.; BERGMANN, J. M.; Effecto f Rainfal Variability on Streamflow Smulation. *Water Resources Research*, V. 5, p. 958-966, 1969.

DEVIA, G. K.; GANASRI, B. P.; DWARAKISH, G. S. A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, v. 4, p. 1001–1007, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2214241X15001273>>. Acessado: 10 de abril de 2019.

DISKIN, M. H. On the determination of the speed of moving rainfall patterns. *Hydrological Sciences Journal*, v. 6667, 1987.

DOTTORI, F.; ALMON, P.; ALAS, M.; BIANCHI, A.; THIELEN, J.; FEYEN, L. A Near Real-Time Procedure for Flood Hazard Mapping and Risk Assessment in Europe. *E-*

proceedings of the 36th IAHR World Congress, n. 28 June – 3 July, 2015, The Hague, the, p. 1–8, 2015.

DOUINOT, A.; ROUX, H.; GARAMBOIS, P.A.; LARNIER, K.; LABAT, D. Accounting for rainfall systematic spatial variability in flash flood forecasting. *Journal of Hydrology*, v. 541, p. 359–370, 2015.

ELGA, S.; JANB, B.; OKKE, B. Hydrological modelling of urbanized catchments: A review and future directions. *Journal of Hydrology*, p. 1–20, 2015.

ELLIOTT, A. H.; TROWSDALE, S. A. A review of models for low impact urban stormwater drainage. *Environmental Modelling & Software*, v. 22, p. 394–405, 2007.

EMMANUEL, I.; ANDRIEU, H.; LEBLOIS, E.; JANEY, N.; PAYRASTRE, O. Influence of rainfall spatial variability on rainfall – runoff modelling : Benefit of a simulation approach ?. *Journal of Hydrology* . v. 531, p. 337–348, 2015.

EMMANUEL, I.; PAYRASTRE, O.; ANDRIEU, H.; ZUBER, F. Influence of the spatial variability of rainfall on hydrograph modelling at catchment outlet: a case study in the Cevennes region, France. *E3S Web of Conferences 7. FLOODrisk 2016 - 3rd European Conference on Flood Risk Management*. DOI: 10.1051/e3sconf/20160718004, p. 1-8, 2016.

EWEN, J. Hydrograph matching method for measuring model performance. *Journal of Hydrology*, v. 408, n. 1–2, p. 178–187, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.07.038>>. Acessado: 25 de maio de 2019.

FARIA, N.; BARBASSA, A.; SILVEIRA, A. Monitoramento, Modelagem e Simulação de Cenários para a Bacia do Córrego Barbado - Cuiabá/MT. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 165–176, 2013.

FAURÈS, J. M.; GOODRICH, D. C.; WOOLHISER, D. A.; SOROOSHIAN, S. Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling. *Journal of Hydrology*, v. 173, n. 1–4, p. 309–326, 1995.

FORMIGA, K. T. M.; CARVALHO, M.; SILVA, K. A.; SOARES, A. K. Calibração do Storm Water Management Model (SWMM) utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 21, n. 4, p. 697–707, 2016.

G1 MINAS - BELO HORIZONTE. *PBH vai monitorar 9 pontos críticos da cidade durante período chuvoso*. Disponível em: <<http://g1.globo.com/minas-gerais/noticia/2013/10/pbh-vai-monitorar-9-pontos-criticos-da-cidade-durante-periodo-chuvoso.html>>. Acessado: 04 de abril de 2019.

GARAMBOIS, P. A.; LARNIER, K.; ROUX, H.; LABAT, D.; DARTUS, D. Analysis of flash flood-triggering rainfall for a process-oriented hydrological model. *Atmospheric Research*, v. 137, p. 14–24, 2014.

GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D. Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia do Arroio Cancela - RS. *Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal de Santa Maria*, p. 10, 2006. Disponível em: <<http://eprints.uanl.mx/5481/1/1020149995.PDF>>. Acessado: 26 de maio de 2019.

GILEWSKI, P.; NAWALANY, M. Inter-comparison of Rain-Gauge, Radar, and Satellite (IMERG GPM) precipitation estimates performance for rainfall-runoff modeling in a mountainous catchment in Poland. *Water*, v. 10, n. 11, p. 1–23, 2018.

G1 Minas. *Janeiro mais chuvoso da história de BH termina com quase triplo da chuva esperada para o mês*. Foto. Cristiane Mattos/Reuters, 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/minas-gerais/noticia/2020/02/01/janeiro-mais-chuvoso-da-historia-de-bh-termina-com-quase-3-vezes-mais-chuva-que-a-media-esperada-para-o-mes.ghtml>>. Acesso em: 01 janeiro de 2020.

GOERL, R. F.; KOBİYAMA, M. Considerações sobre as inundações no Brasil. *Associação Brasileira de Recursos Humanos*, p. 14, 2005. Disponível em: <http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/ABRH2005_inundacoes.pdf>. Acessado: 27 de maio de 2019.

GUAN, M.; SILLANPÄÄ, N.; KOIVUSALO, H. Modelling and assessment of hydrological changes in a developing urban catchment. *Hydrological Processes*, v. 29, n. 13, p. 2880–2894, 2015.

GÜLBAZ, S.; KAZEZYILMAZ-ALHAN, C. M.; BAHÇEÇİ, A.; BOYRAZ, U. Flood Modeling of Ayamama River Watershed in Istanbul, Turkey. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 24, n. 1, p. 05018026, 2018.

GÜLBAZ, S.; KAZEZYILMAZ-ALHAN, C. M. Calibrated Hydrodynamic Model for Sazlıdere Watershed in Istanbul and Investigation of Urbanization Effects. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 18, n. 1, p. 75–84, 2013.

HARTKAMP, A. D.; BEURS, K.; STEIN, A.; WHITE, J. W. Interpolation Techniques for Climate Variables. *Cimmyt*, 1999.

HUANG, C. L.; HSU, N. S.; WEI, C. C.; LUO, W. J. Optimal spatial design of capacity and quantity of rainwater harvesting systems for urban flood mitigation. *Water (Switzerland)*, v. 7, n. 9, p. 5173–5202, 2015.

HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E. *Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual*. Gainesville, Florida: U.S. Environmental Protection Agency, 1992. 493 p.

JORNAL O TEMPO, Redação. *Chuva: Vilarinho foi interditada e avenidas da cidade estão alagadas*. Disponível em: <<https://www.otempo.com.br/cidades/chuva-vilarinho-foi-interditada-e-avenidas-da-cidade-estao-alagadas-1.2137716>>. Acessado: 04 de abril de 2019.

KLONGVESSA, P.; LU, M.; CHOTPANTARAT, S. Response of the flood peak to the spatial distribution of rainfall in the Yom River basin, Thailand. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 32, n. 10, p. 2871–2887, 2018.

KREBS, G.; KOKKONEN, T.; VALTANEN, M.; KOIVUSALO, H.; SETÄLÄ, H. A high resolution application of a stormwater management model (SWMM) using genetic parameter optimization. *Urban Water Journal*, v. 10, n. 6, p. 394–410, 2013.

KREBS, G.; KOKKONEN, T.; VALTANEN, M.; SETÄLÄ, H.; KOIVUSALO, H. Spatial resolution considerations for urban hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, v. 512, p.

482-497, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.013>>. Acessado: 24 de maio de 2019.

LANDIM, P. M. B. Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. *Geomatemática, Texto Didático02*. UNESP/campus de Rio Claro Departamento de Geologia Aplicada, p. 1-18, 2000. Disponível em:

<<file:///D:/MESTRADO%20UFMG/DISSERTA%C3%87%C3%83O%20UFMG/REFER%C3%84NCIAL/Interpola%C3%A7%C3%A3o/surfer03.pdf>>. Acessado: 28 de maio de 2019.

LI, C.; LIU, M.; HU, Y.; GONG, J.; XU, Y. Modeling the quality and quantity of runoff in a highly urbanized catchment using storm water management model. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 25, n. 4, p. 1573–1581, 2016.

LIMA, F. N. *Dinâmica de Precipitações Extremas em Eventos de Inundações Urbanas: Aspectos Espaciais e Hidrológicos*. 2019. p. 164. Tese (Programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

LIONG, SY; CHAN, W. T.; SHREERAM, J. Peak-Flow Forecasting with Genetic Algorithm and SWMM. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 121, n. 8, p. 613–617, 2002.

LU, G. Y.; WONG, D. W. An adaptive inverse-distance weighting spatial interpolation technique. *Computers & Geosciences*, v. 34, p. 1044–1055, 2008.

LUCAS, T. P. B.; PLEC, D.; ABREU, M. L.; PARIZZI, M. G. Identificação de interpoladores adequados a dados de chuva a partir de parâmetros estatísticos. *Revista Brasileira de Climatologia*, v. 13, p. 7–21, 2013.

MARCIANO, A. G.; BARBOSA, A. A.; SILVA, A. P. M. Cálculo de precipitação média utilizando método de Thiessen e as linhas de cumeada. *Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, p. 9, 2017.

MASSERONI, D.; CISLAGHI, A. Green roof benefits for reducing flood risk at the catchment scale. *Environmental Earth Sciences*, v. 75, n. 7, p. 1–11, 2016.

MATEO-LÁZARO, J. M.; NAVARRO, J. A. S.; GIL, A.G.; ROMERO, V. E. Sensitivity analysis of main variables present in flash flood processes. Application in two Spanish catchments: Arás and Aguilón. *Environmental Earth Sciences*, v. 71, n. 6, p. 2925–2939, 2014.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. *Hidrologia Estatística*. Belo Horizonte: Cprm, 2007.

NIAZI, M.; CHRIS, N.; MAHDI, M.; NICOLE, J.; BRITTANY, R. B.; MICHAEL, T.; ARASH, M. Storm Water Management Model: Performance Review and Gap Analysis. *Journal of Sustainable Water Built Environ*, v. 3, n. 2, p. 1–32, 2017. Disponível em: <<http://ascelibrary.org/doi/10.1061/JSWBAY.0000817>>. Acessado: 25 de maio de 2019.

NICÓTINA, L.; COLEGON, E. A.; REINALDO, A.; MARANI, M. On the impact of rainfall patterns on the hydrologic response. *Water Resources Research*, v. 44, n. 12, p. 1–14, 2008.

OCHOA-RODRIGUEZ, S.; WANG, L-P.; GIRES, A.; PINA, R. D.; REINOSO-RONDINEL, R.; BRUNI, G.; ICHIBA, A.; GAITAN, S.; CRISTIANO, E.; ASSEL, J.V.; KROLL, S.; MURLA-TUYLS, D.; TISSERAND, B.; SCHERTZER, D.; TCHIGUIRINSKAIA, I.; ONOF, C.; WILLEMS, P.; VELDHUIS, M-C.T. Impact of spatial and temporal resolution of rainfall inputs on urban hydrodynamic modelling outputs: A multi-catchment investigation. *Journal of Hydrology*, v. 531, p. 389–407, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.05.035>>. Acessado: 15 de abril de 2019.

PBH. *PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE*. 2000. Plano Diretor de Drenagem Urbana de Belo Horizonte. Belo Horizonte.

PBH. *PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE*. 2010. Relatório: *Monitoramento Hidrológico Bacias Arrudas e Onça. Estabelecimento de Curvas-Chave*. Belo Horizonte.

PBH. *PREFEITURA MUNICIPAL DE BELO HORIZONTE*. 2011. Relatório: *Consolidação do Diagnósticos das Enchentes na Bacia do Córrego Cachoeirinha e dos Ribeirões Pampulha e da Onca – V.1*. Belo Horizonte.

PBH. *PLANO MUNICIPAL DE SANEAMENTO DE BELO HORIZONTE – PMS 2016/2019*. Belo Horizonte - MG. 2016. v. I. Disponível em:

<[https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/obras-e-infraestrutura/PMS 2016 - 2019 – Volume I – Texto.pdf](https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/obras-e-infraestrutura/PMS%202016%20-%202019%20-%20Volume%20I%20-%20Texto.pdf)>. Acessado: 08 de abril de 2019.

RIGHETTO, A. M. *Manejo De Águas Pluviais Urbanas*. Rio de Janeiro: ABES, 2009.

RIGHI, E.; BASSO, L. A. Aplicação e análise de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas. *Ambiência Guarapuava*, v. 1, p. 101–117, 2016.

ROSSMAN, L. *Manual do usuário - EPA SWMM 5.0 - Modelo de Gestão de Drenagem Urbana*. João Pessoa, Brasil: U.S. Environmental Protection Agency, 2012. Disponível em:<http://www.lenhs.ct.ufpb.br/html/downloads/swmm/SWMM_2012.pdf>. Acessado: 20 de abril de 2019.

SEGOND, M. L.; WHEATER, H. S.; ONOF, C. The significance of spatial rainfall representation for flood runoff estimation: A numerical evaluation based on the Lee catchment, UK. *Journal of Hydrology*, v. 347, n. 1–2, p. 116–131, 2007.

SIGAROODI, S. K.; CHEN, Q. Effects and consideration of storm movement in rainfall-runoff modelling at the basin scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 20, n. 12, p. 5063–5071, 2016.

SILVESTRO, F.; REBORA, N.; GIANNONI, F.; CAVALLO, A.; FERRARIS, L. The flash flood of the Bisagno Creek on 9th October 2014: An “unfortunate” combination of spatial and temporal scales. *Journal of Hydrology*, v. 541, n. October 2014, p. 50–62, 2016.

SIQUEIRA, R. C. *Construção De Gráfico De Risco De Inundações Em Bacias Urbanas: Estudo De Caso Bacia do Córrego Cachoeirinha*. 2017. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos)- Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG.

SIQUEIRA, R. C.; MOURA, P. M.; SILVA, T. F. G. Methodology for the construction of an urban flood hazard chart. *Revista Brasileira de Recursos Hidricos*, v. 24, p. 1–16, 2019.

SOUSA, R. E. S.; GONÇALVES, G. F. G. Um Estudo Sobre os Impactos Decorrentes de Inundações no Município de Belo Horizonte. *Revista Gestão e Sustentabilidade Ambiental*, v. 7, n. 3, p.591-605, 2018.

TOLSON, B. A.; SHOEMAKER, C. A. Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. *Water Resources Research*, v. 43, n. 1, p.1-16, 2007.

TUCCI, C. E. M. *Modelos Hidrológicos*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul: ABRH, 2005.

VARGAS, T.; GOMES, M. G.; BELLADONA, R.; ADAMI, M. V. D. Aplicação do Interpolador IDW para Elaboração de Mapas Hidrogeológicos Paramétricos na Região da Serra Gaúcha. *Scientia cum Industria*, v. 6, n. 3, p. 38-43, 2018.

VENTURA, L. A. *Ferramenta de Auxílio à Emissão de Alerta de Inundações Urbanas: Metodologia Associando as Características das Precipitações com a Probabilidade de Ocorrência de Alerta*. 2018. p. 165. Dissertação (Programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.

WAGNER, P. D.; FIENER, P.; WILKEN, F.; KUMAR, S.; SCHNEIDER, K. Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. *Journal of Hydrology*, v. 464–465, p. 388–400, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.07.026>>. Acessado: 29 de maio de 2019.

WILSON, C. B.; VALDES, J. B.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the influence of the spatial distribution of rainfall on storm runoff. *Water Resources Research*, v. 15, n. 2, p. 321–328, 1979.

WOODS, R.; SIVAPALAN, M. A synthesis of space-time variability in storm response: Rainfall, runoff generation, and routing. *Water Resources Research*, v. 35, n. 8, p. 2469–2485, 1999.

XU, Z.; ZHAO, G. Impact of urbanization on rainfall-runoff processes: Case study in the liangshui river basin in Beijing, China. *Copernicus Publications*, v. 373, p. 7–12, 2016.

YOON, S.; LEE, B. Effects of Using High-Density Rain Gauge Networks and Weather Radar Data on Urban Hydrological Analyses. *water*, p. 18, 2017.

ZAGHLOUL, N. A. Sensitivity analysis of the SWMM Runoff-Transport parameters and the effects of catchment discretisation. *Adv. Water Resources*, v. 6, p. 214–223, 1983. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0309170883900593>>. Acessado: 20 de abril de 2019.

ZOCCATELLI, D.; BORGA, M.; VIGLIONE, A.; CHIRICO, G. B.; BLOSCHL, G. Spatial moments of catchment rainfall: Rainfall spatial organisation, basin morphology, and flood response. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 15, n. 12, p. 3767–3783, 2011.

ZOCCATELLI, D.; BORGA, M.; ZANON, F.; ANTONESCU, B.; STANCALIE, G. Which rainfall spatial information for flash flood response modelling? A numerical investigation based on data from the Carpathian range, Romania. *Journal of Hydrology*, v. 394, n. 1–2, p. 148–161, 2010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.07.019>>. Acessado: 21 de abril de 2019.

**APÊNDICE A: TABELAS RESUMO – EVENTOS QUE GERAM ALERTA DA
SÉRIE DE DADOS DE SETEMBRO DE 2011 ATÉ MAIO DE 2019**

2011			
DATA	HORA	NÍVEL	ALERTA
02/12/2011	14:50:00	210,0	AMARELO
05/12/2011	21:10:00	216,0	AMARELO
05/12/2011	21:20:00	216,0	AMARELO
14/12/2011	15:40:00	261,0	AMARELO
15/12/2011	10:30:00	215,0	AMARELO
21/12/2011	18:30:00	482,0	LARANJA
21/12/2011	18:40:00	632,0	VERMELHO
27/12/2011	23:20:00	211,0	AMARELO
30/12/2011	20:40:00	263,0	AMARELO
30/12/2011	20:50:00	654,0	VERMELHO
30/12/2011	21:00:00	630,0	VERMELHO
30/12/2011	21:10:00	335,0	AMARELO
2012			
DATA	HORA	NÍVEL	ALERTA
29/01/2012	21:30:00	259,0	AMARELO
30/01/2012	22:40:00	222,0	AMARELO
15/03/2012	20:30:00	224,0	AMARELO
15/03/2012	20:40:00	260,0	AMARELO
29/03/2012	00:30:00	254,0	AMARELO
29/03/2012	00:40:00	221,0	AMARELO
06/04/2012	16:40:00	214,0	AMARELO
04/11/2012	20:50:00	246,0	AMARELO
15/11/2012	20:50:00	609,0	VERMELHO
15/11/2012	21:00:00	655,0	VERMELHO
15/11/2012	21:10:00	457,0	LARANJA
10/12/2012	20:20:00	268,0	AMARELO
10/12/2012	20:30:00	457,0	LARANJA
2013			
DATA	HORA	NÍVEL	ALERTA
07/01/2013	18:10:00	223,0	AMARELO
20/01/2013	20:50:00	261,0	AMARELO
20/01/2013	21:00:00	656,0	VERMELHO
20/01/2013	21:10:00	567,0	LARANJA
30/10/2013	20:00:00	211,0	AMARELO
06/12/2013	04:20:00	228,0	AMARELO
07/12/2013	19:40:00	211,0	AMARELO
11/12/2013	20:50:00	263,0	AMARELO
11/12/2013	21:00:00	337,0	LARANJA
23/12/2013	00:50:00	228,0	AMARELO

2014			
DATA	HORA	NÍVEL	ALERTA
17/02/2014	21:20:00	222,0	AMARELO
17/02/2014	21:30:00	219,0	AMARELO
02/04/2014	20:20:00	289,0	AMARELO
02/04/2014	20:30:00	652,0	VERMELHO
02/04/2014	20:40:00	636,0	VERMELHO
02/04/2014	20:50:00	601,0	VERMELHO
20/04/2014	18:30:00	229,0	AMARELO
2015			
DATA	HORA	NÍVEL	ALERTA
12/03/2015	01:50:00	273,0	AMARELO
12/03/2015	02:00:00	211,0	AMARELO
18/11/2015	08:50:07	232,0	AMARELO
18/11/2015	09:00:07	220,0	AMARELO
18/11/2015	09:20:07	214,0	AMARELO
18/11/2015	09:30:07	224,0	AMARELO
08/12/2015	02:40:06	234,0	AMARELO
2016 (continua)			
DATA	HORA	NÍVEL	ALERTA
17/01/2016	03:10:07	212,0	AMARELO
26/01/2016	07:20:06	231,0	AMARELO
12/02/2016	19:40:06	251,0	AMARELO
12/02/2016	19:50:06	245,0	AMARELO
28/02/2016	19:30:07	214,0	AMARELO
13/03/2016	17:00:07	251,0	AMARELO
13/03/2016	17:10:07	225,0	AMARELO
24/03/2016	07:40:06	211,0	AMARELO
24/03/2016	07:50:06	212,0	AMARELO
22/07/2016	12:00:06	746,0	VERMELHO
22/07/2016	12:10:06	746,0	VERMELHO
22/07/2016	12:20:06	746,0	VERMELHO
22/07/2016	12:30:06	746,0	VERMELHO
22/07/2016	12:40:06	746,0	VERMELHO
22/07/2016	12:50:06	746,0	VERMELHO
22/07/2016	13:00:06	718,0	VERMELHO
22/07/2016	13:10:06	718,0	VERMELHO
22/07/2016	13:20:06	632,0	VERMELHO
22/07/2016	13:30:06	632,0	VERMELHO
22/07/2016	13:40:06	632,0	VERMELHO
22/07/2016	13:50:06	632,0	VERMELHO
22/07/2016	14:00:06	632,0	VERMELHO

2016 (continuação)			
22/07/2016	14:10:06	632,0	VERMELHO
22/07/2016	14:20:06	532,0	LARANJA
22/07/2016	14:30:06	400,0	LARANJA
22/07/2016	14:40:07	300,0	AMARELO
22/07/2016	14:50:07	288,0	AMARELO
12/11/2016	15:30:06	217,0	AMARELO
04/12/2016	03:40:06	211,0	AMARELO
2017			
DATA	HORA	NÍVEL	ALERTA
19/03/2017	04:50:07	212,0	AMARELO
03/10/2017	02:40:00	240,0	AMARELO
23/10/2017	18:50:00	210,0	AMARELO
12/11/2017	07:20:00	227,0	AMARELO
03/12/2017	21:50:00	241,0	AMARELO
03/12/2017	22:00:00	243,0	AMARELO
10/12/2017	04:00:00	232,0	AMARELO
16/12/2017	18:20:00	235,0	AMARELO
16/12/2017	18:30:00	213,0	AMARELO
30/12/2017	17:30:00	241,0	AMARELO
30/12/2017	17:40:00	237,0	AMARELO
2018			
DATA	HORA	NÍVEL	ALERTA
03/01/2018	22:50:00	267,0	AMARELO
30/01/2018	20:10:00	246,0	AMARELO
24/02/2018	19:00:00	222,0	AMARELO
24/02/2018	19:20:00	670,0	VERMELHO
24/02/2018	19:30:00	629,0	VERMELHO
24/02/2018	19:40:00	438,0	LARANJA
05/03/2018	05:20:00	258,0	AMARELO
05/03/2018	20:00:00	268,0	AMARELO
09/03/2018	03:30:00	241,0	AMARELO
09/03/2018	03:40:00	216,0	AMARELO
09/03/2018	04:00:00	243,0	AMARELO
16/03/2018	20:20:00	276,0	AMARELO
16/03/2018	20:30:00	604,0	VERMELHO
19/10/2018	21:30:00	216,0	AMARELO
25/10/2018	21:00:00	228,0	AMARELO
06/12/2018	23:40:00	225,0	AMARELO
22/12/2018	18:10:00	250,0	AMARELO
22/12/2018	18:20:00	256,0	AMARELO
26/12/2018	21:10:00	214,0	AMARELO

DATA	HORA	2019 NÍVEL	ALERTA
16/02/2019	12:50:00	234,0	AMARELO
17/02/2019	16:10:00	213,0	AMARELO
17/02/2019	20:00:00	270,0	AMARELO
17/02/2019	20:10:00	617,0	VERMELHO
17/02/2019	20:20:00	217,0	AMARELO

**APÊNDICE B: TABELAS RESUMO – MAPAS DE CHUVA DOS EVENTOS
ESCOLHIDOS PARA SIMULAÇÃO**

Evento 05/12/2011

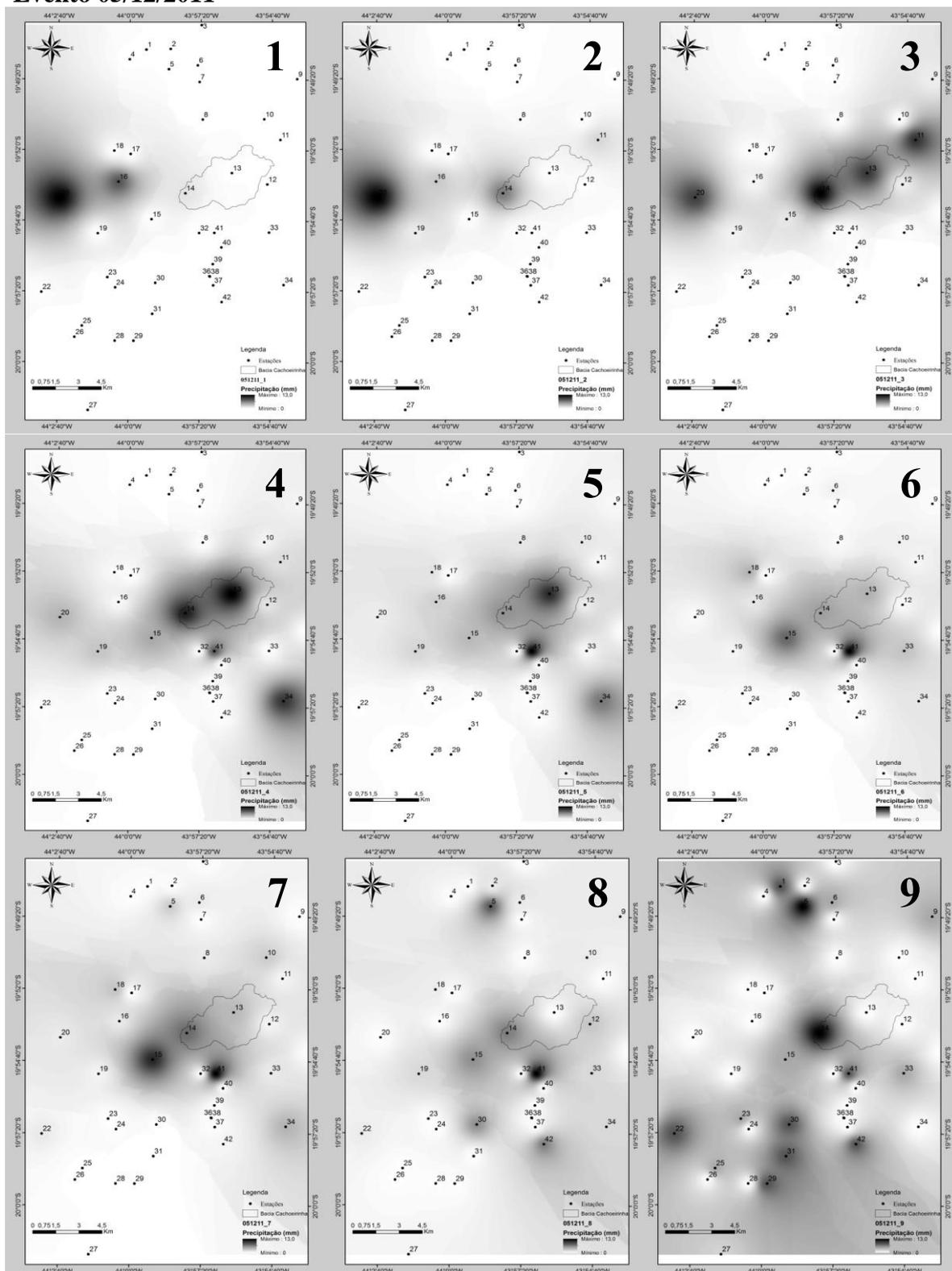


Figura 1 - (1) Evento 05/12/11 10 min; (2) Evento 05/12/11 20 min; (3) Evento 05/12/11 30 min; (4) Evento 05/12/11 40 min; (5) Evento 05/12/11 50 min; (6) Evento 05/12/11 60 min; (7) Evento 05/12/11 70 min; (8) Evento 05/12/11 80 min; (9) Evento 05/12/11 90 min

Evento 12/12/2011

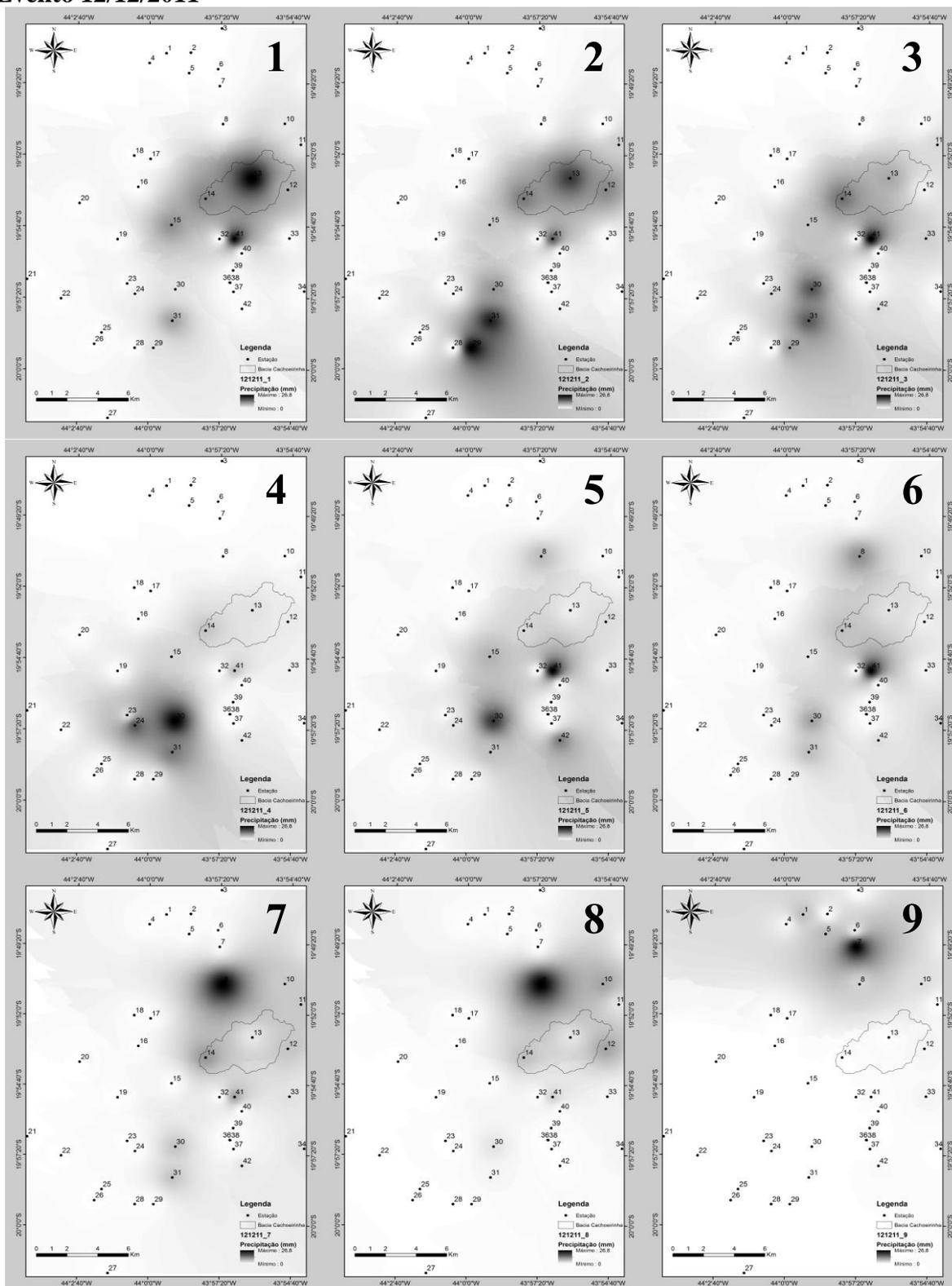


Figura 2 - (1) Evento 12/12/11 10 min; (2) Evento 12/12/11 20 min; (3) Evento 12/12/11 30 min; (4) Evento 12/12/11 40 min; (5) Evento 12/12/11 50 min; (6) Evento 12/12/11 60 min; (7) Evento 12/12/11 70 min; (8) Evento 12/12/11 80 min; (9) Evento 12/12/11 90 min(continua)

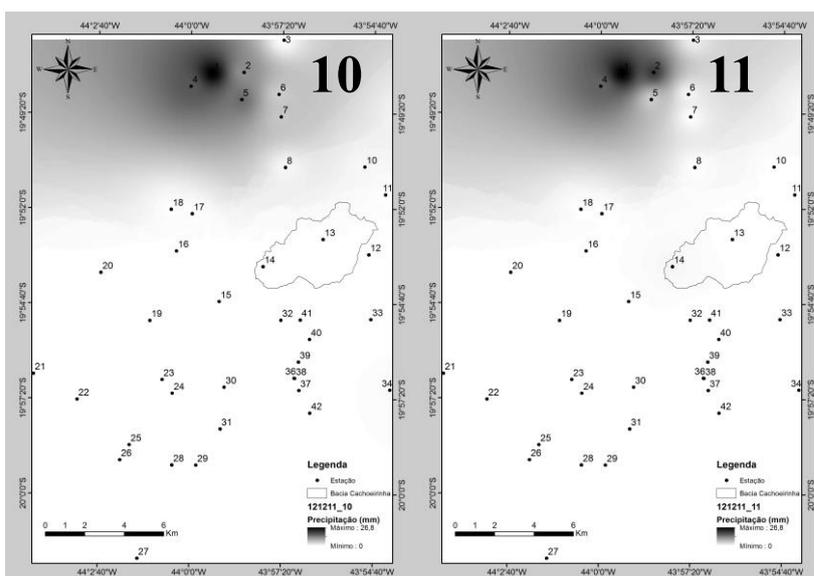


Figura 2 - (10) Evento 12/12/11 100 min; (11) Evento 12/12/11 110 min (continuação)

Evento 30/12/2011

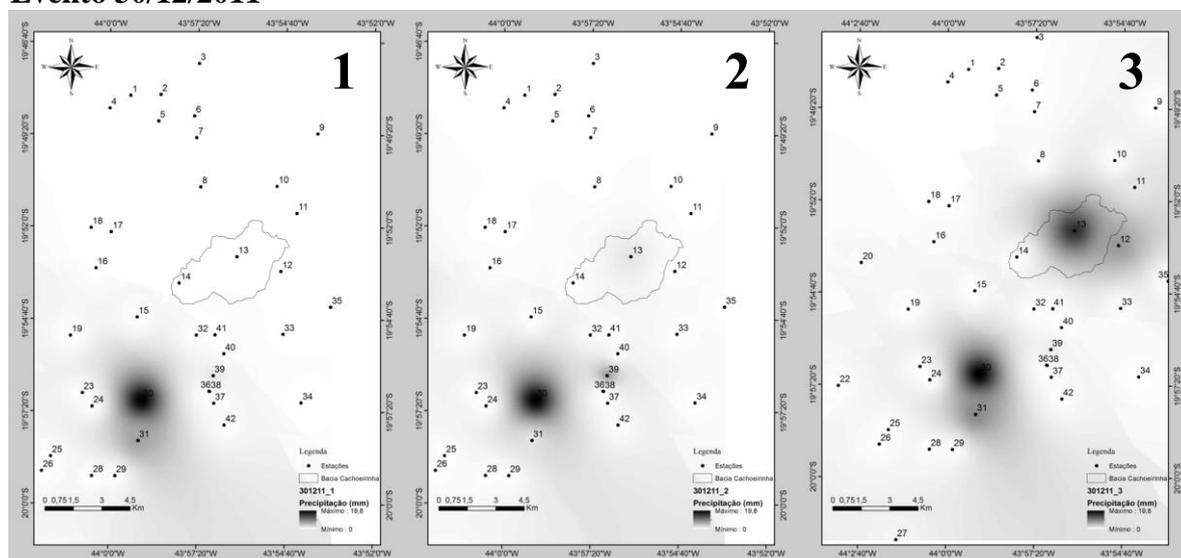


Figura 3 - (1) Evento 30/12/11 10 min; (2) Evento 30/12/11 20 min; (3) Evento 30/12/11 30 min (continua)

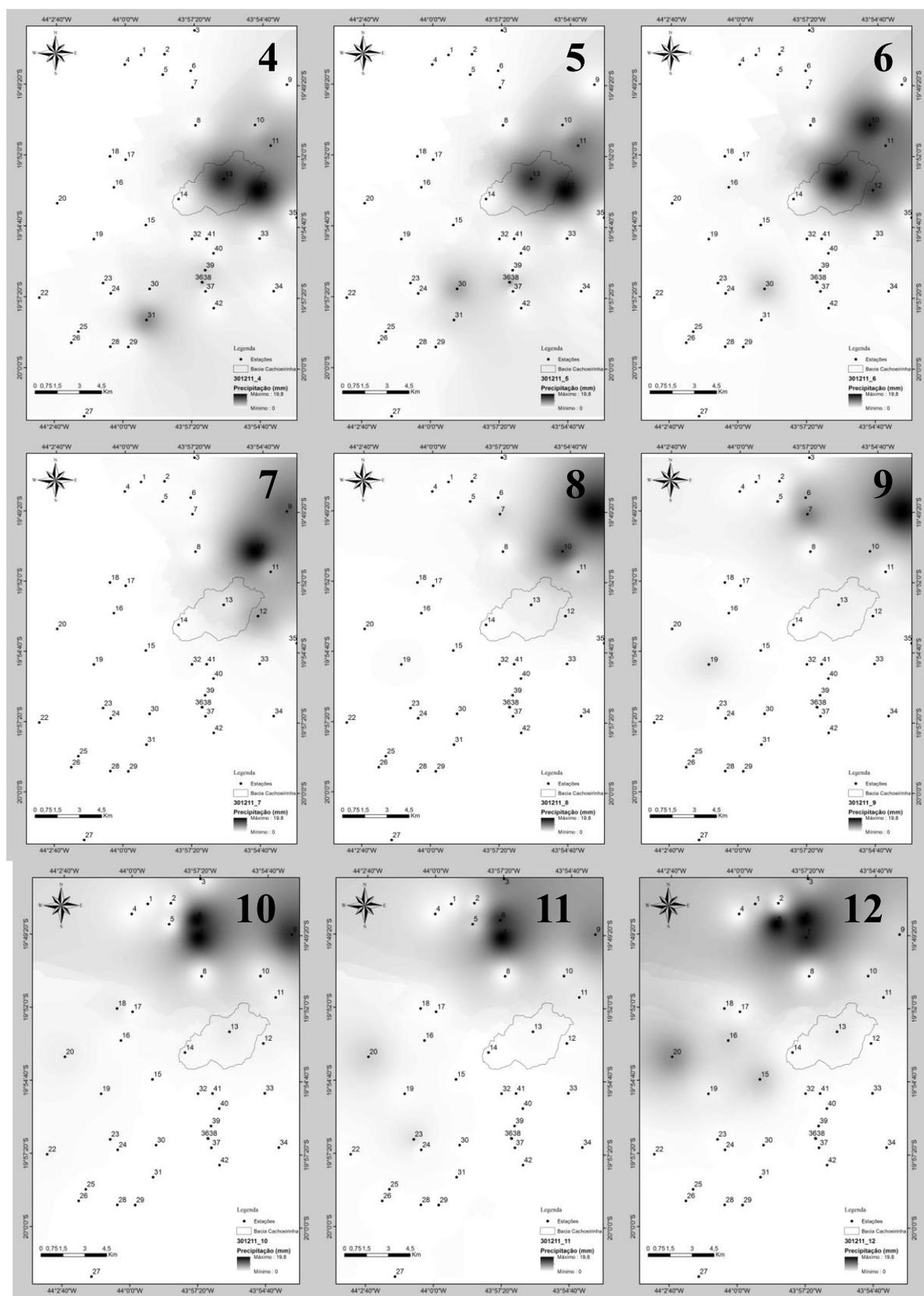


Figura 3 - (4) Evento 30/12/11 40 min; (5) Evento 30/12/11 50 min; (6) Evento 30/12/11 60 min; (7) Evento 30/12/11 70 min; (8) Evento 30/12/11 80 min; (9) Evento 30/12/11 90 min;

(10) Evento 30/12/11 100 min; (11) Evento 30/12/11 110 min; (12) Evento 30/12/11 120 min (continua)

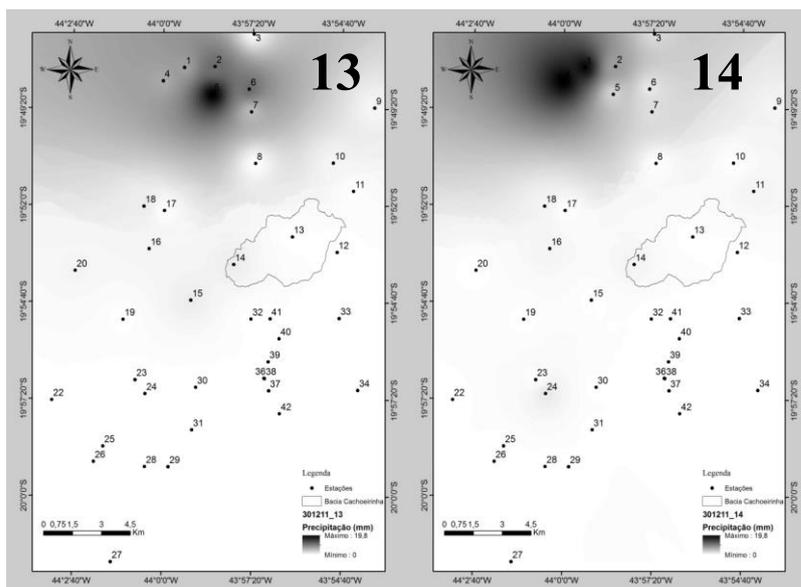


Figura 3 - (13) Evento 30/12/11 130 min; (14) Evento 30/12/11 140 min (continuação)

Evento 30/01/2012

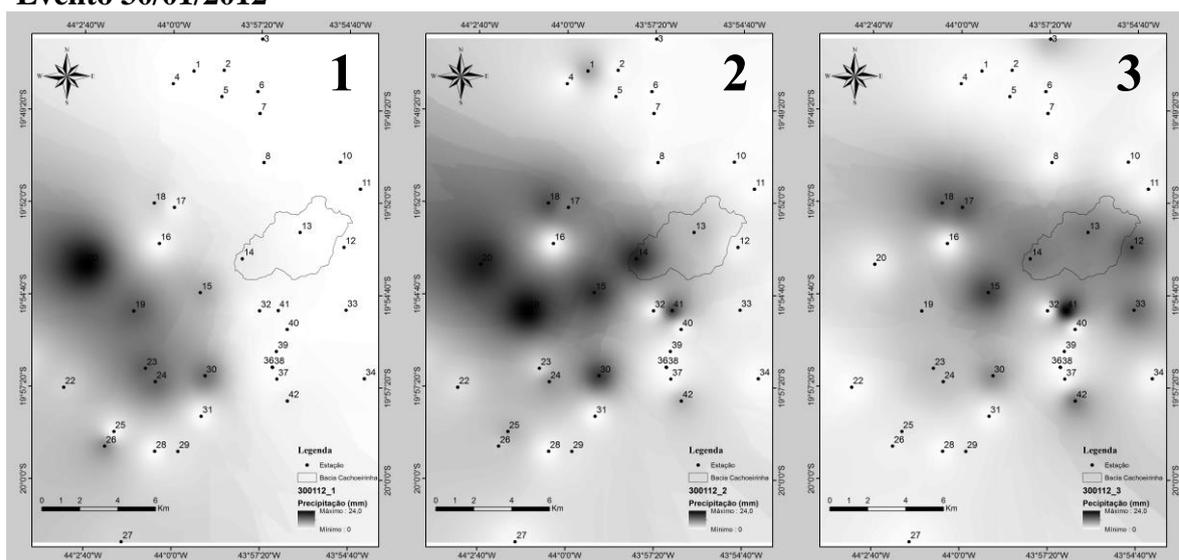


Figura 4 - (1) Evento 30/01/12 10 min; (2) Evento 30/01/12 20 min; (3) Evento 30/01/12 30 min (continua)

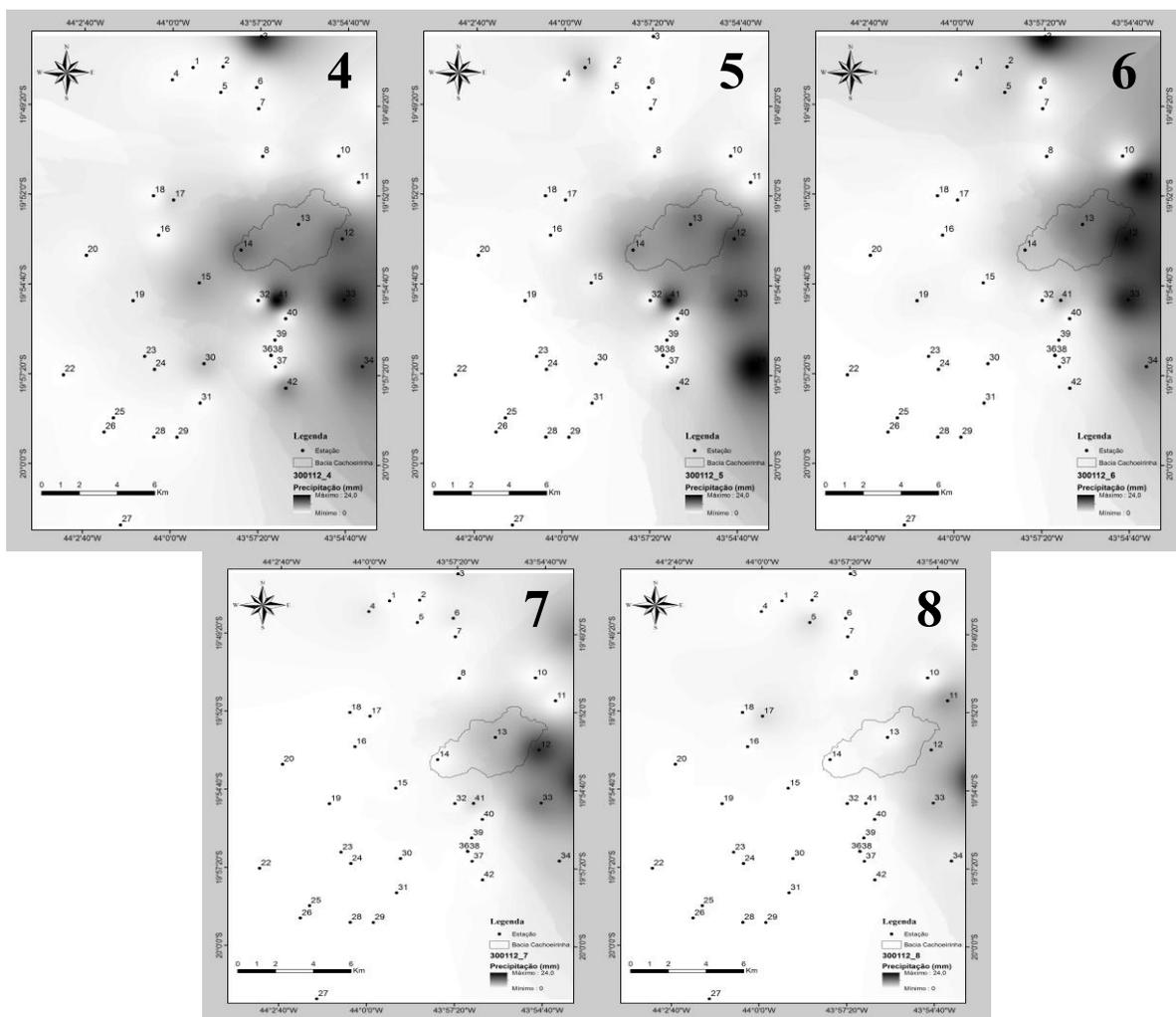


Figura 4 - (4) Evento 30/01/12 40 min; (5) Evento 30/01/12 50 min; (6) Evento 30/01/12 60 min; (7) Evento 30/01/12 70 min; (8) Evento 30/01/12 80 min (continuação)

Evento 10/12/2012

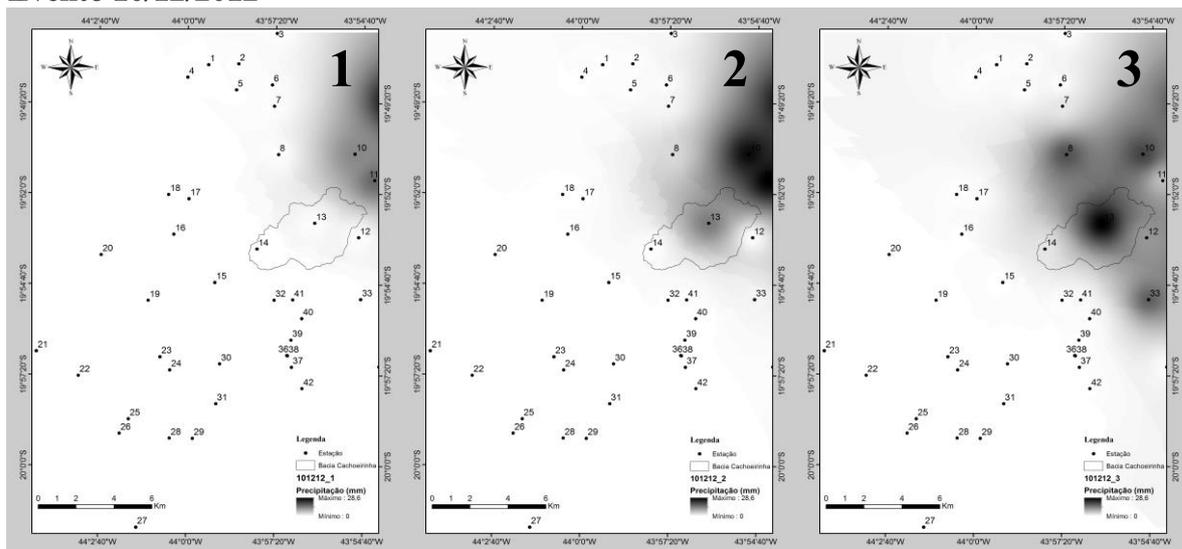


Figura 5 - (1) Evento 10/12/12 10 min; (2) Evento 10/12/12 20 min; (3) Evento 10/12/12 30 min (continua)

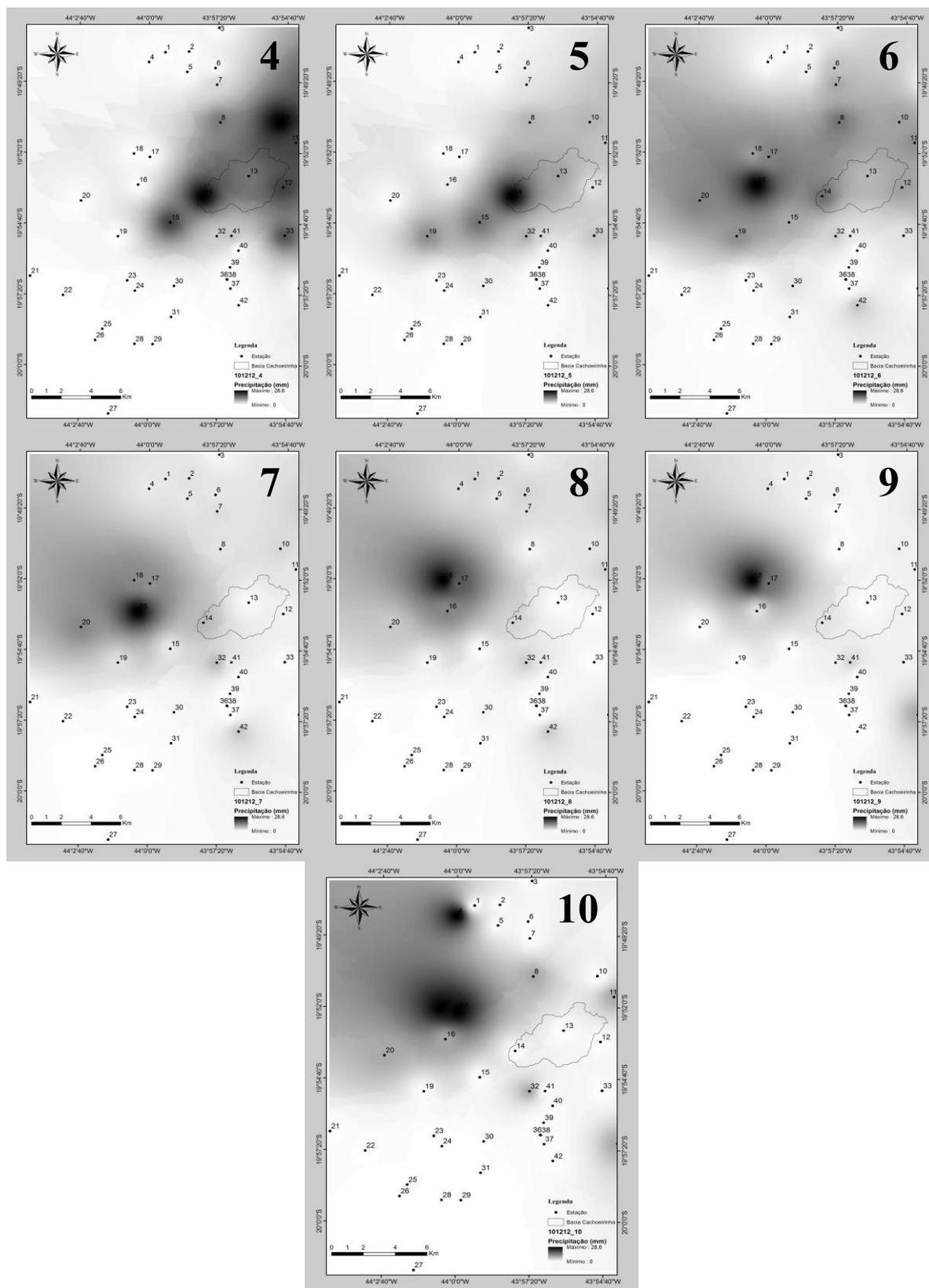


Figura 5 - (4) Evento 10/12/12 40 min; (5) Evento 10/12/12 50 min; (6) Evento 10/12/12 60 min; (7) Evento 10/12/12 70 min; (8) Evento 10/12/12 80 min;(9) Evento 10/12/12 90 min;(10) Evento 10/12/12 100 min (continuação)

Evento 30/10/2013

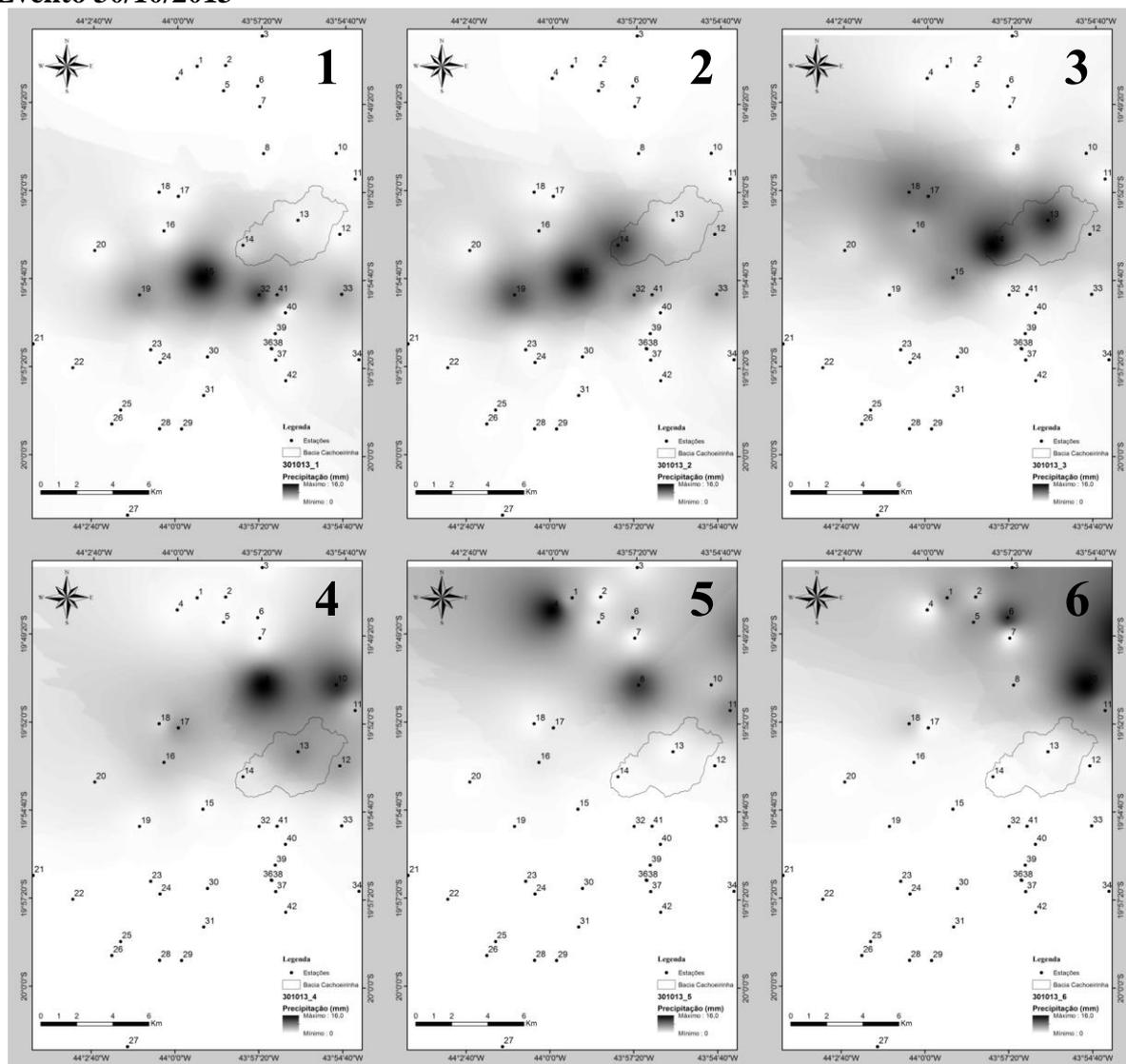


Figura 6 - (1) Evento 30/10/13 10 min; (2) Evento 30/10/13 20 min; (3) Evento 30/10/13 30 min; (4) Evento 30/10/13 40 min; (5) Evento 30/10/13 50 min; (6) Evento 30/10/13 60 min

Evento 17/02/2014

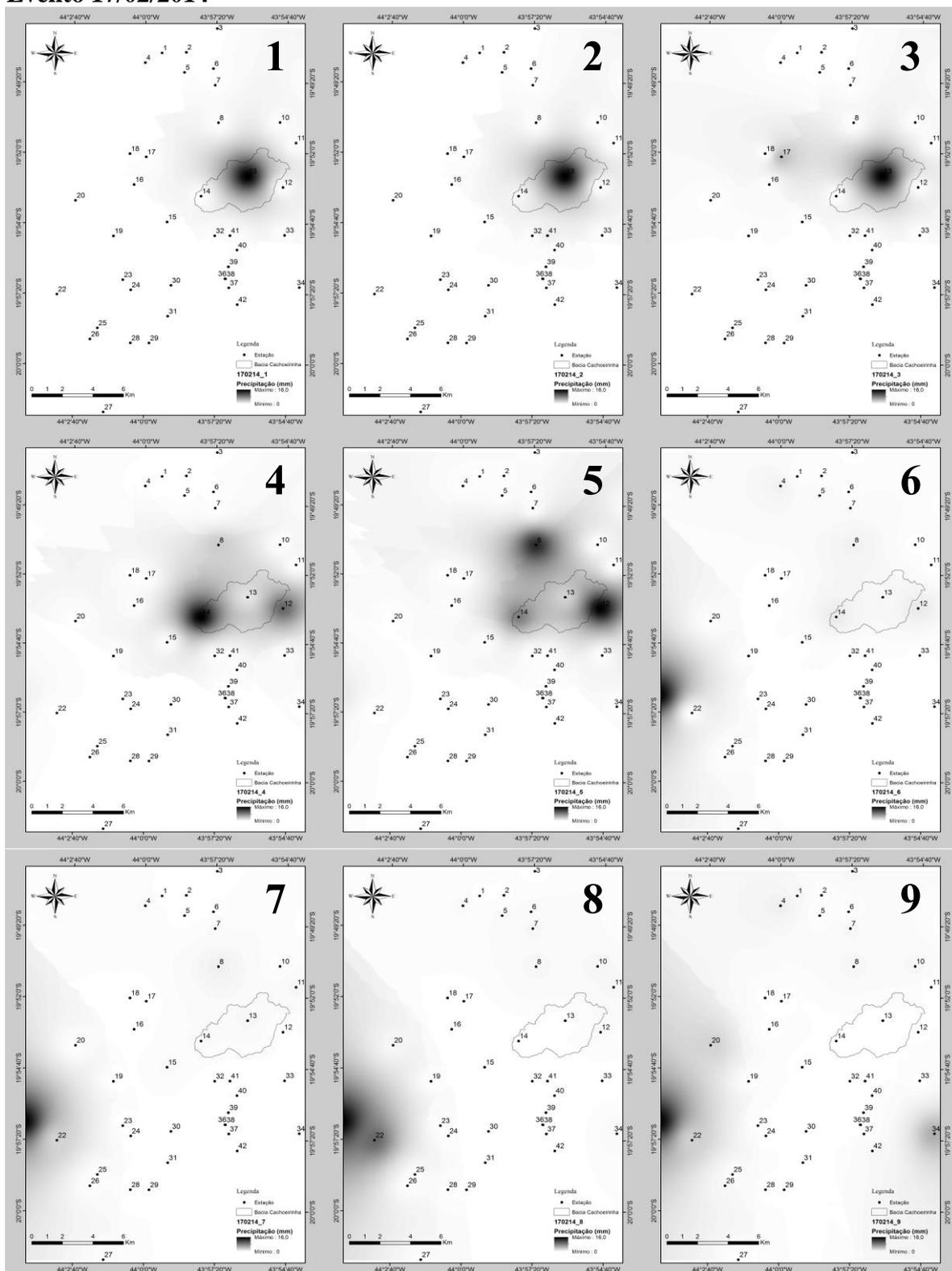


Figura 7 - (1) Evento 17/02/14 10 min; (2) Evento 17/02/14 20 min; (3) Evento 17/02/14 30 min; (4) Evento 17/02/14 40 min; (5) Evento 17/02/14 50 min; (6) Evento 17/02/14 60 min; (7) Evento 17/02/14 70 min; (8) Evento 17/02/14 80 min; (9) Evento 17/02/14 90 min
(continua)

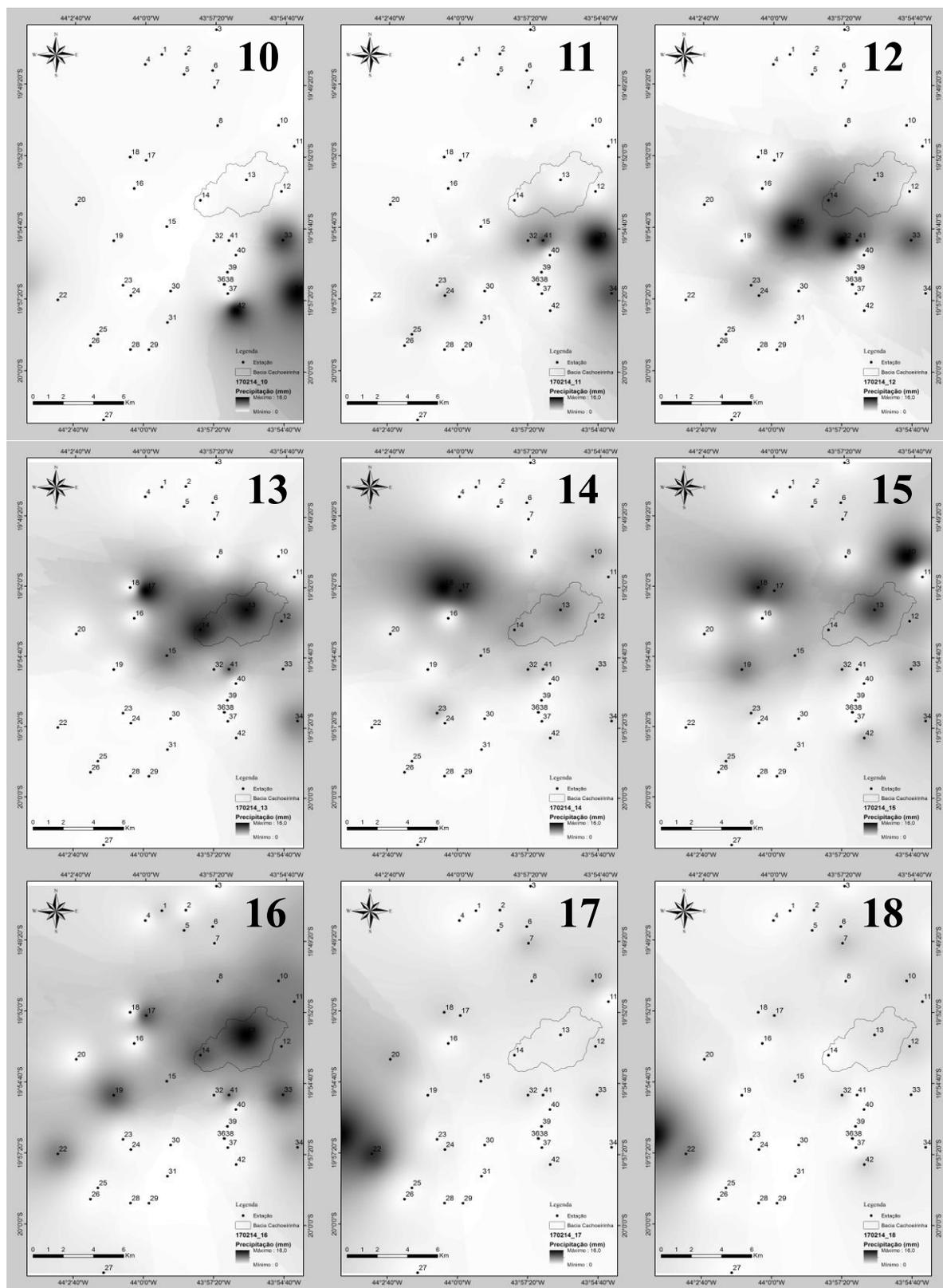


Figura 7 - (10) Evento 17/02/14 100 min; (11) Evento 17/02/14 110 min; (12) Evento 17/02/14 120 min; (13) Evento 17/02/14 130 min; (14) Evento 17/02/14 140 min; (15) Evento 17/02/14 150 min; (16) Evento 17/02/14 160 min; (17) Evento 17/02/14 170 min; (18) Evento 17/02/14 180 min (continua)

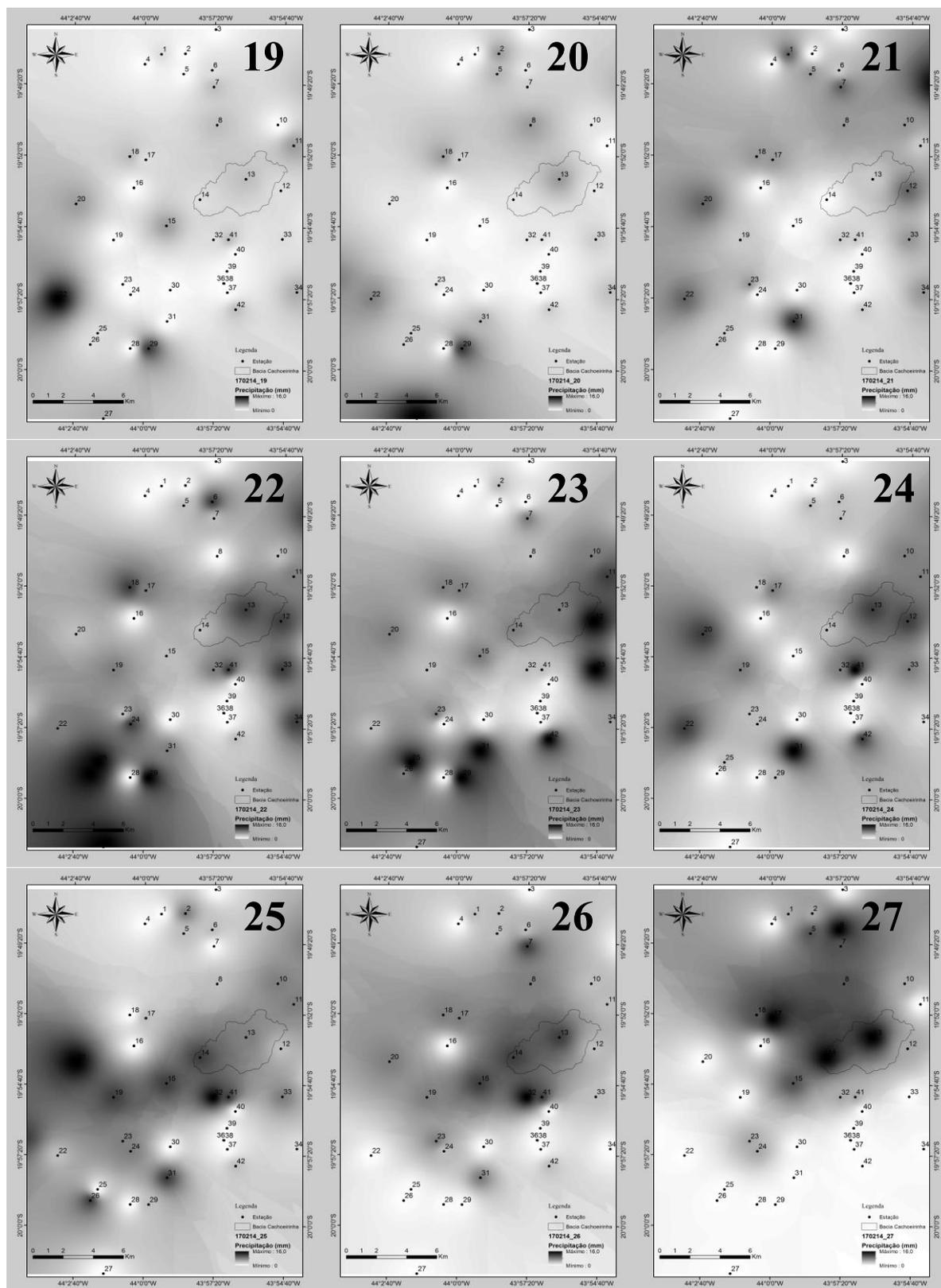


Figura 7 - (19) Evento 17/02/14 190 min; (20) Evento 17/02/14 200 min; (21) Evento 17/02/14 210 min; (22) Evento 17/02/14 220 min; (23) Evento 17/02/14 230 min; (24) Evento 17/02/14 240 min; (25) Evento 17/02/14 250 min; (26) Evento 17/02/14 260 min; (27) Evento 17/02/14 270 min (continua)

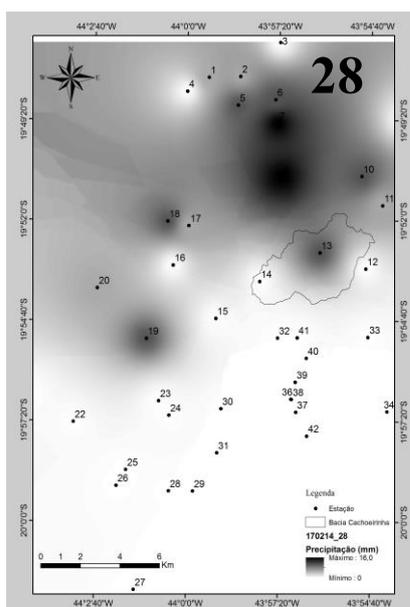


Figura 7 - (28) Evento 17/02/14 280 min (continuação)

Evento 03/04/2014

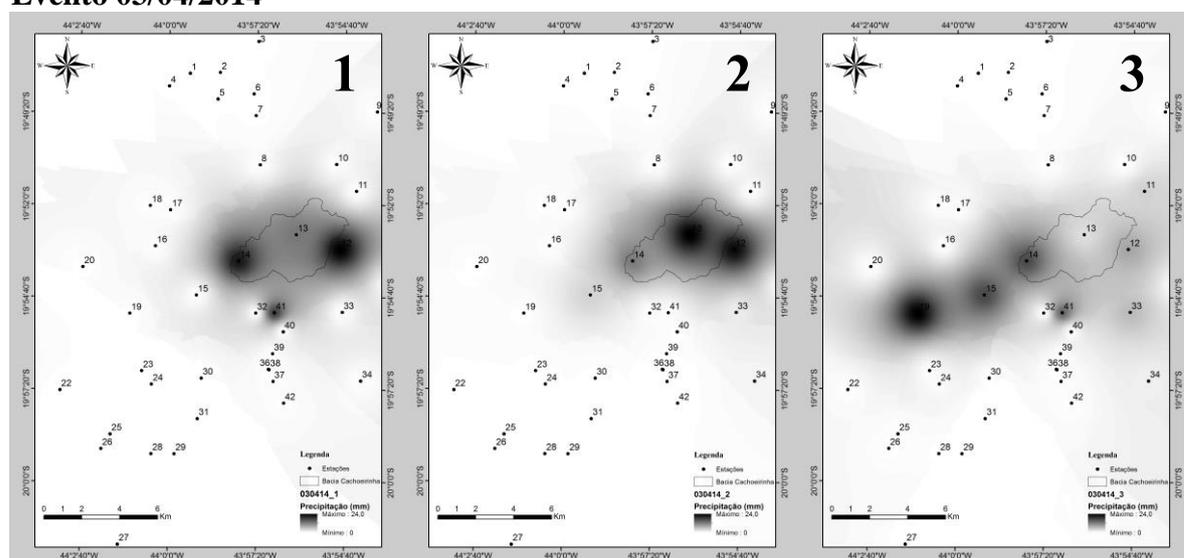


Figura 8 - (1) Evento 03/04/14 10 min; (2) Evento 03/04/14 20 min; (3) Evento 03/04/14 30 min (continua)

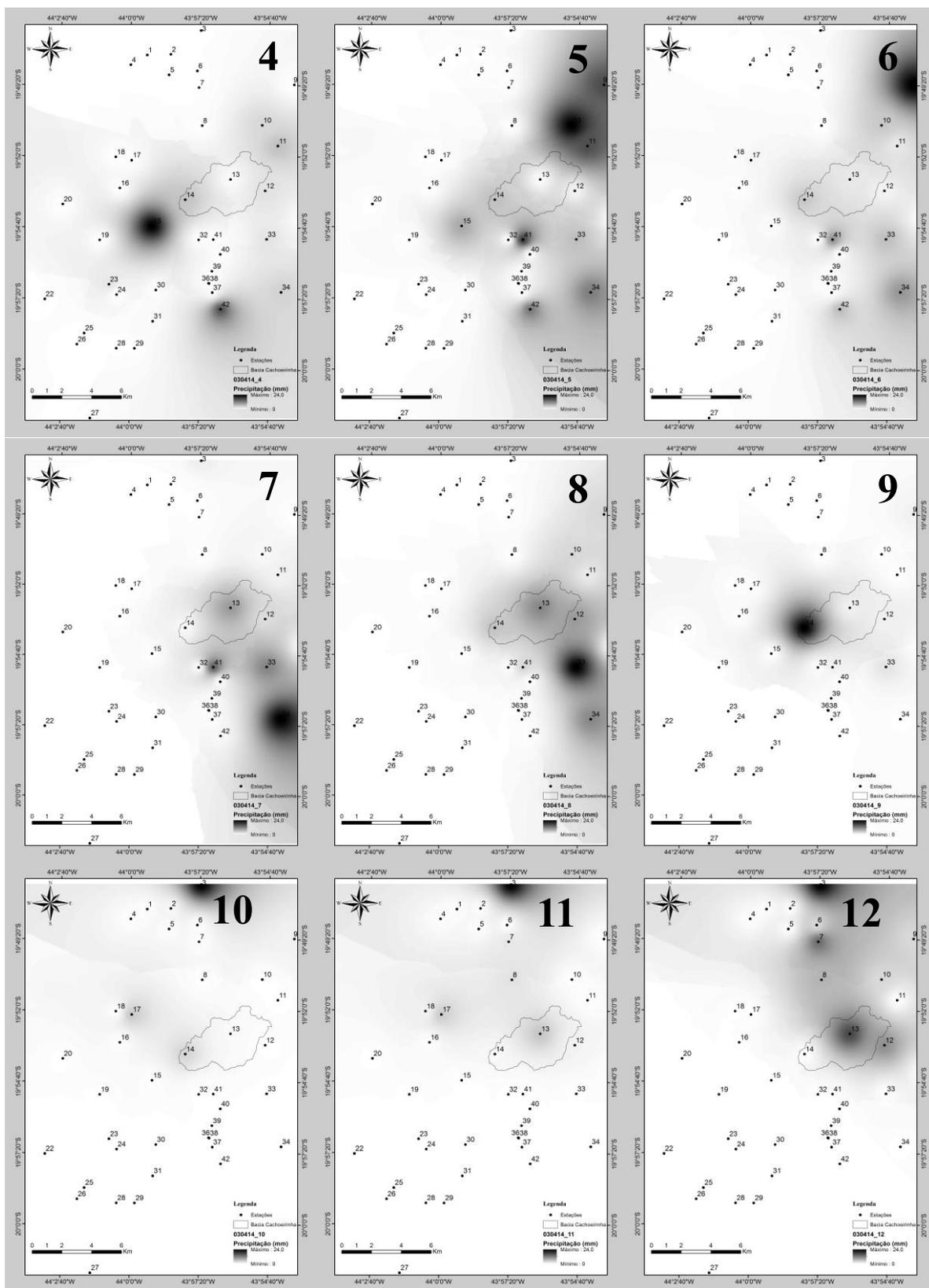


Figura 8 - (4) evento 03/04/14 40 min; (5) evento 03/04/14 50 min; (6) evento 03/04/14 60 min; (7) evento 03/04/14 70 min; (8) evento 03/04/14 80 min; (9) evento 03/04/14 90

min; (10) evento 03/04/14 100 min; (11) evento 03/04/14 110 min; (12) evento 03/04/14 120 min (continua)

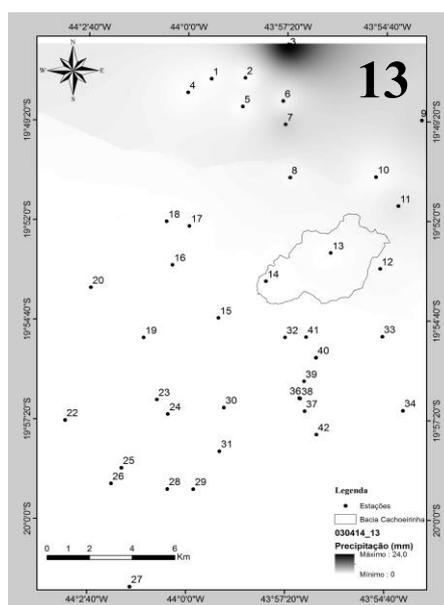


Figura 8 - (13) Evento 03/04/14 130 min (continuação)

Evento 12/03/2015

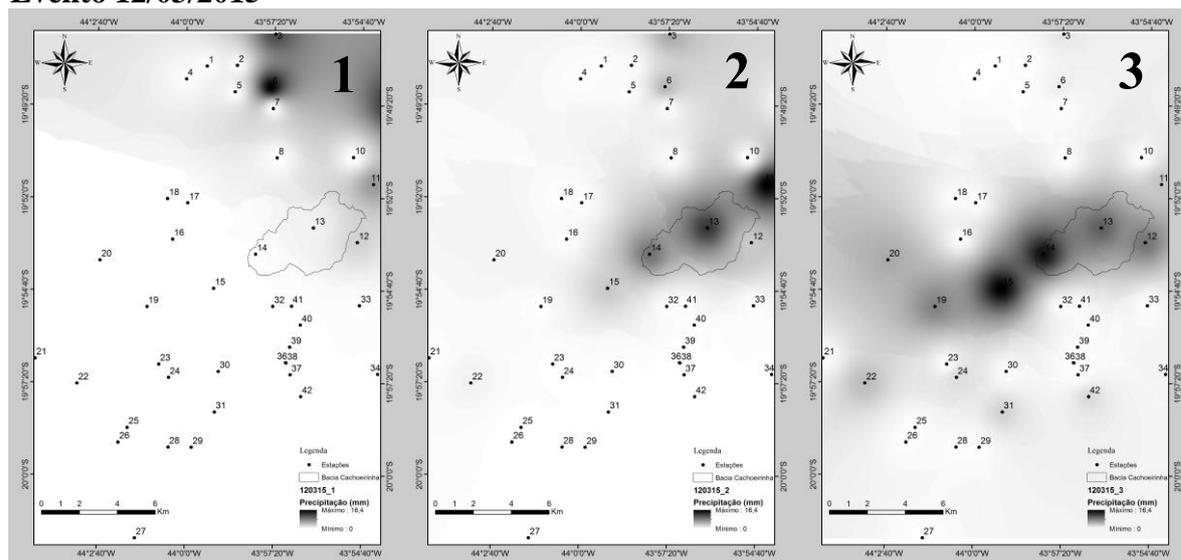


Figura 9 - (1) Evento 12/03/15 10 min; (2) Evento 12/03/15 20 min; (3) Evento 12/03/15 30 min (continua)

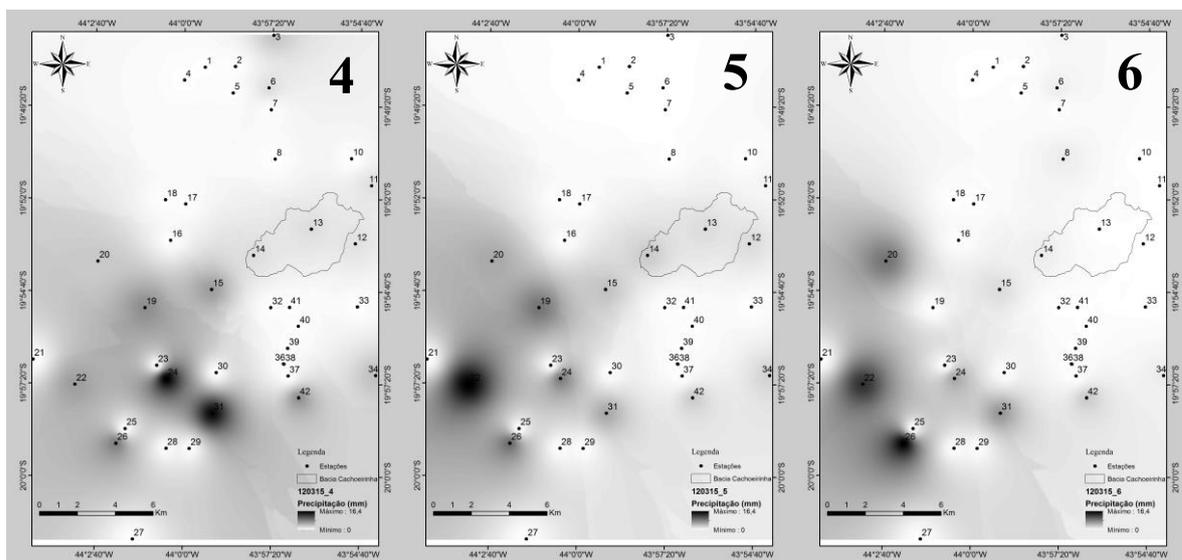


Figura 9 - (4) Evento 12/03/15 40 min; (5) Evento 12/03/15 50 min;(6) Evento 12/03/15 60 min (continuação)

Evento 08/12/2015

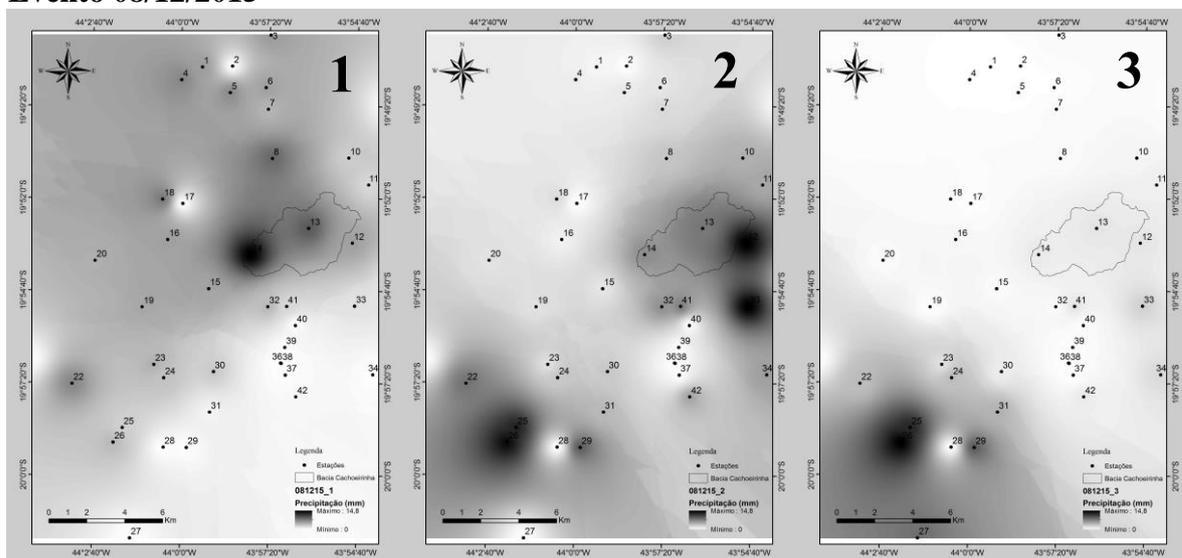


Figura 10 - (1) Evento 08/12/15 10 min; (2) Evento 08/12/15 20 min;(3) Evento 08/12/15 30 min (continua)

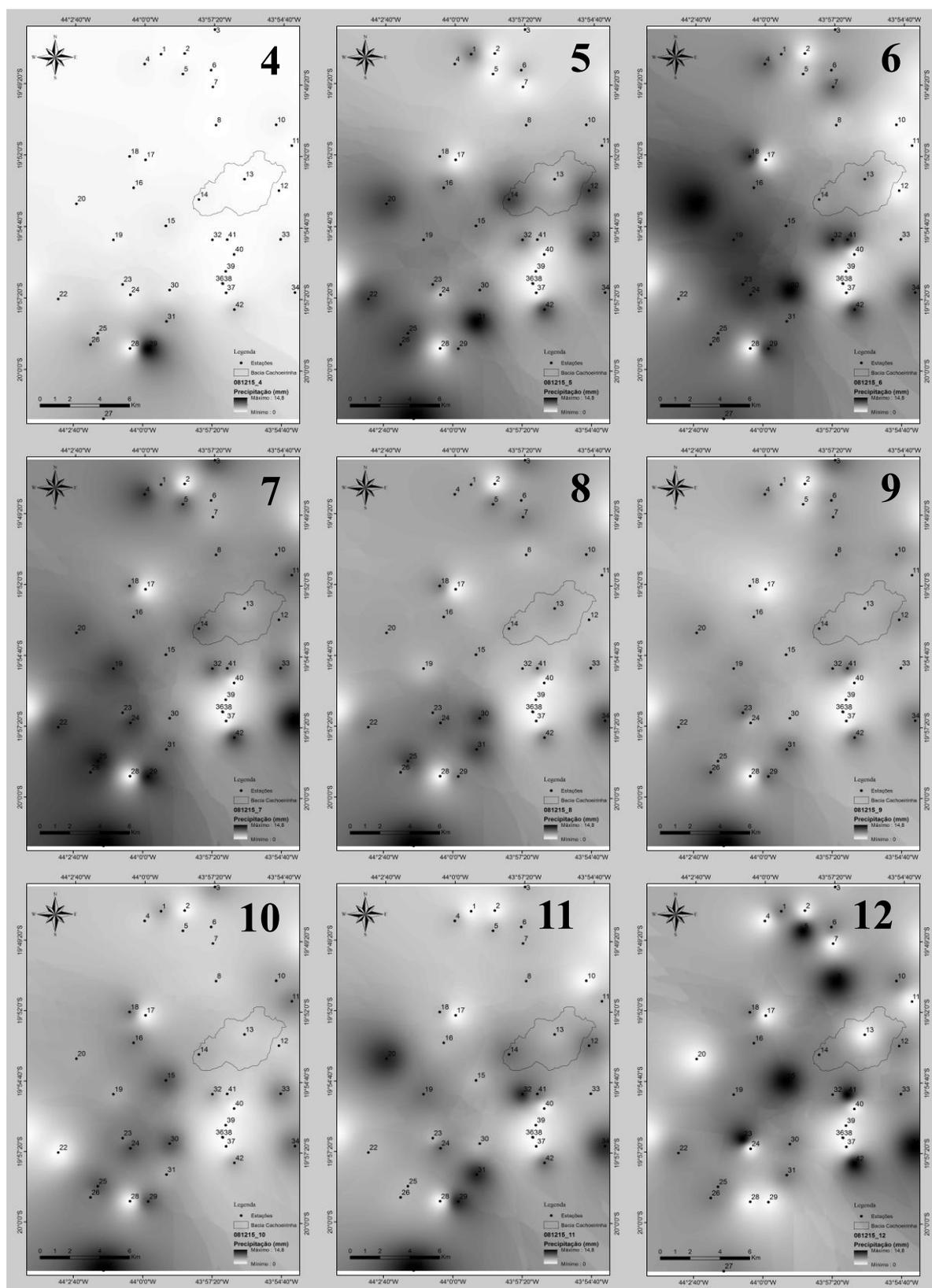


Figura 10 - (4) Evento 08/12/15 40 min; (5) Evento 08/12/15 50 min; (6) Evento 08/12/15 60 min; (7) Evento 08/12/15 70 min; (8) Evento 08/12/15 80 min; (9) Evento 08/12/15 90 min; (10) Evento 08/12/15 100 min; (11) Evento 08/12/15 110 min; (12) Evento 08/12/15 120 min
(continua)

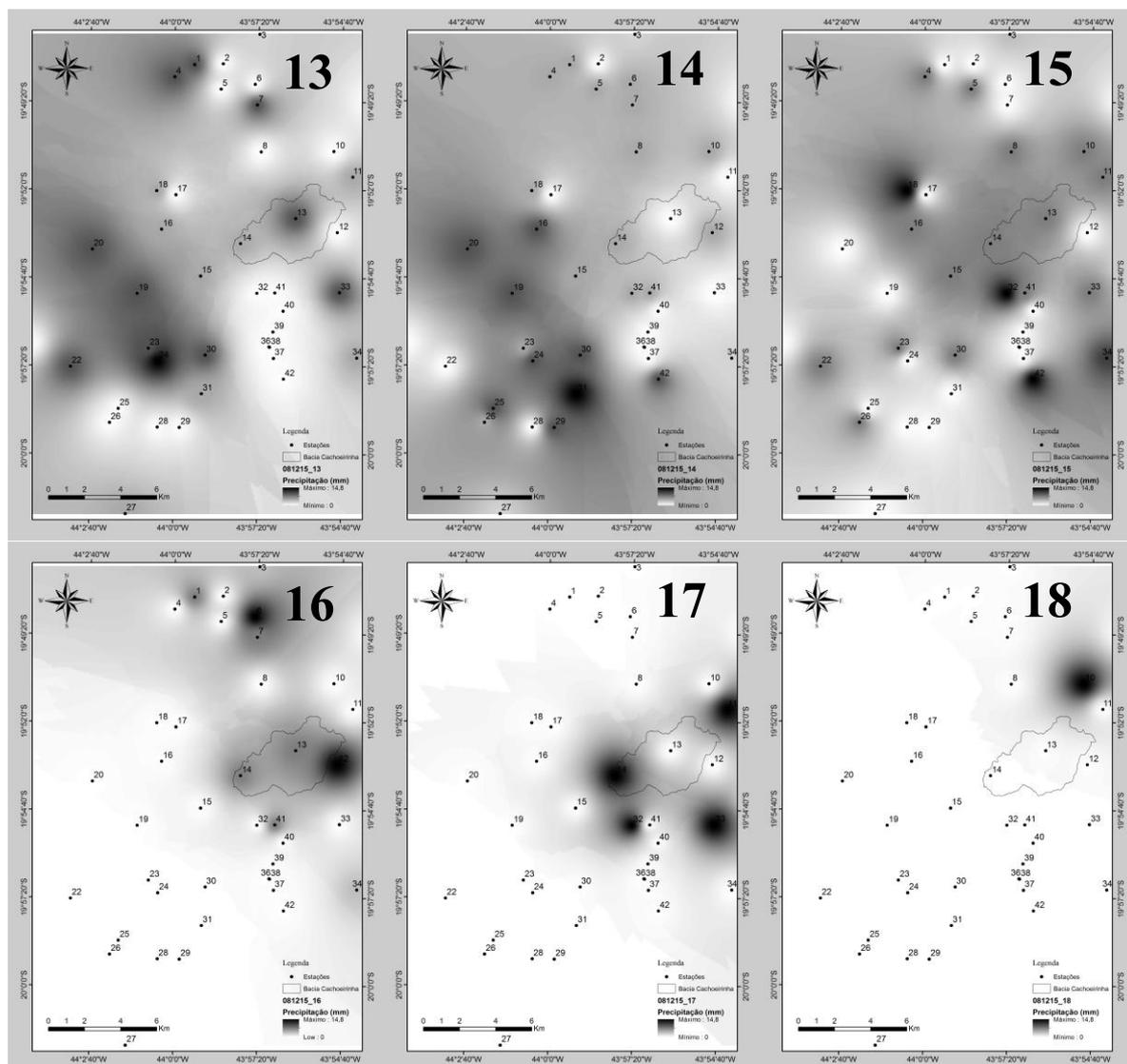


Figura 10 - (13) Evento 08/12/15 130 min; (14) Evento 08/12/15 140 min; (15) Evento 08/12/15 150 min; (16) Evento 08/12/15 160 min; (17) Evento 08/12/15 170 min; (18) Evento 08/12/15 180 min (continuação)

Evento 28/02/2016

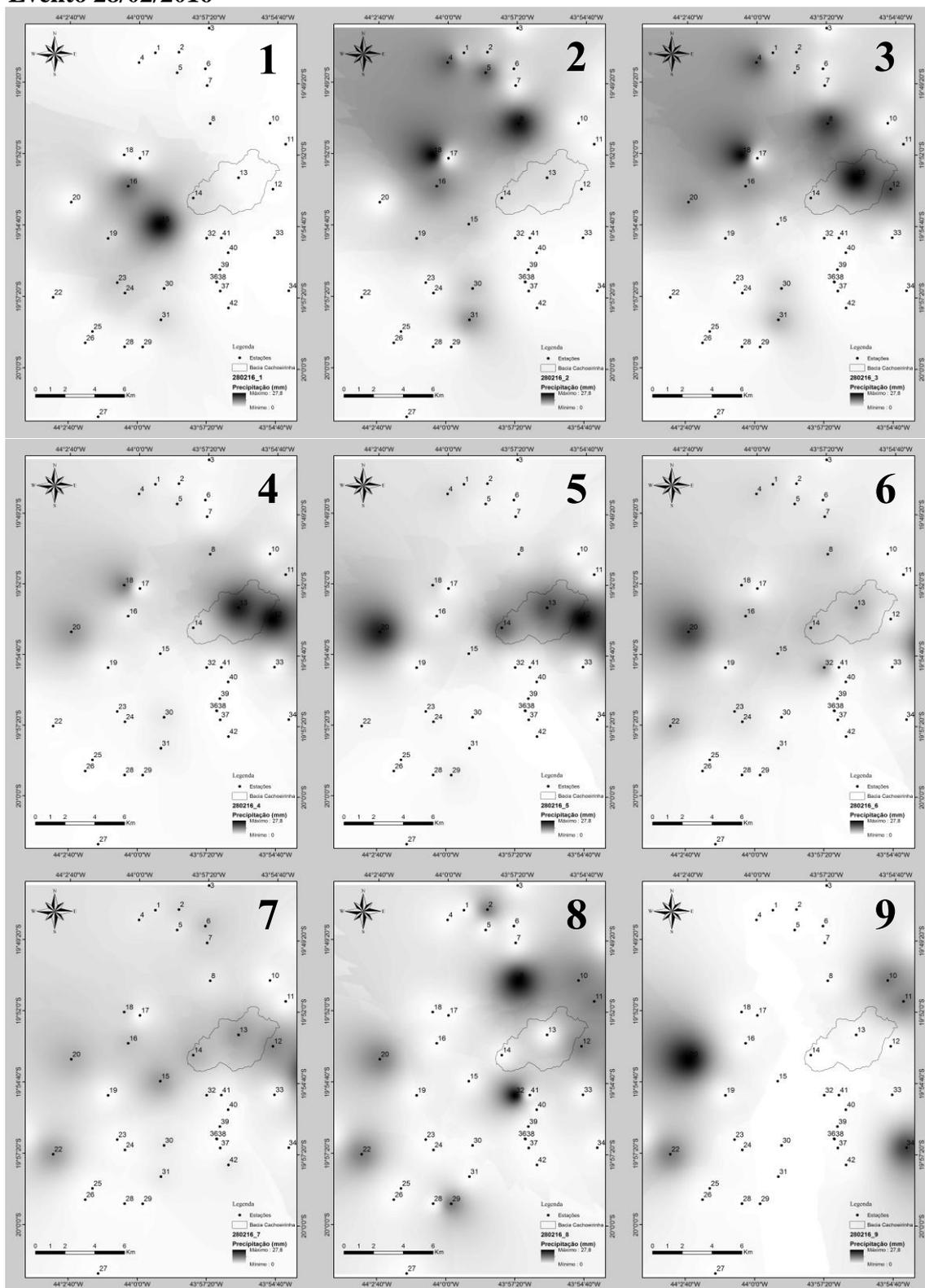


Figura 11 - (1) Evento 28/02/16 10 min; (2) Evento 28/02/16 20 min; (3) Evento 28/02/16 30 min; (4) Evento 28/02/16 40 min; (5) Evento 28/02/16 50 min; (6) Evento 28/02/16 60 min; (7) Evento 28/02/16 70 min; (8) Evento 28/02/16 80 min; (9) Evento 28/02/16 90 min
(continua)

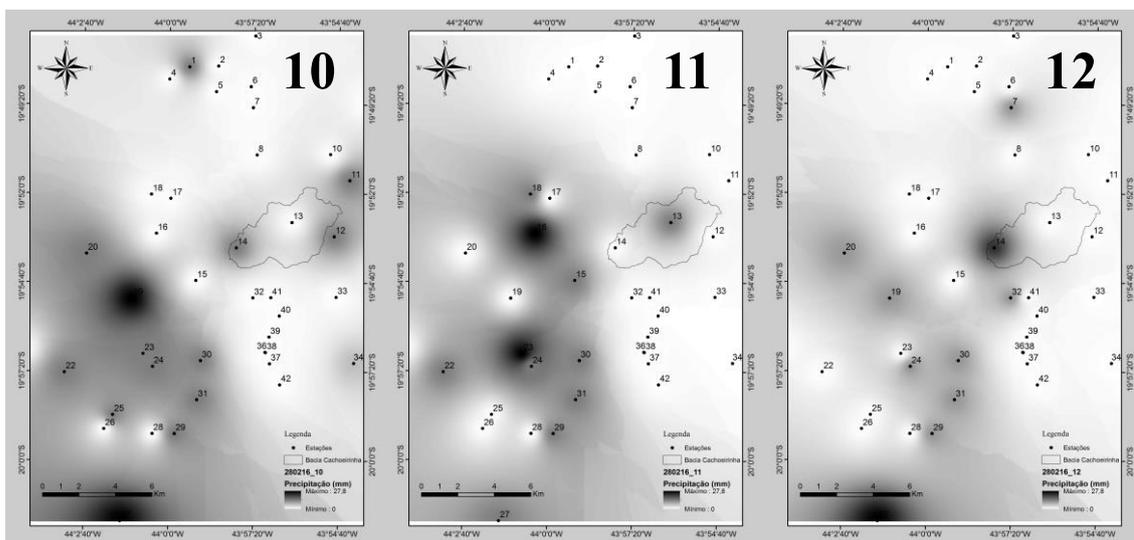


Figura 11 - (10) Evento 28/02/16 100 min; (11) Evento 28/02/16 110 min; (12) Evento 28/02/16 120 min (continuação)

Evento 24/03/2016

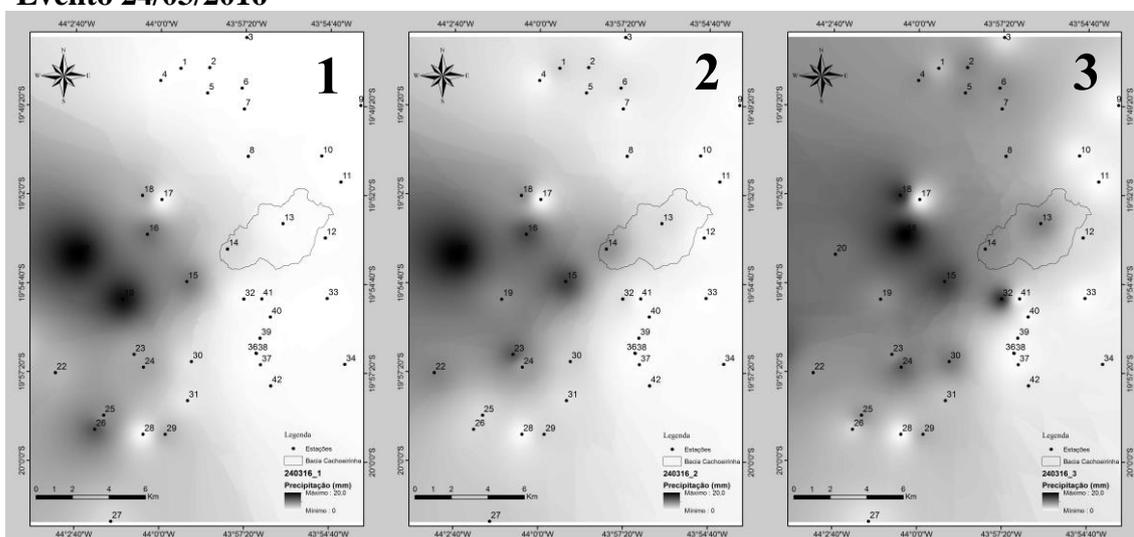


Figura 12 - (1) Evento 24/03/16 10 min; (2) Evento 24/03/16 20 min; (3) Evento 24/03/16 30 min (continua)

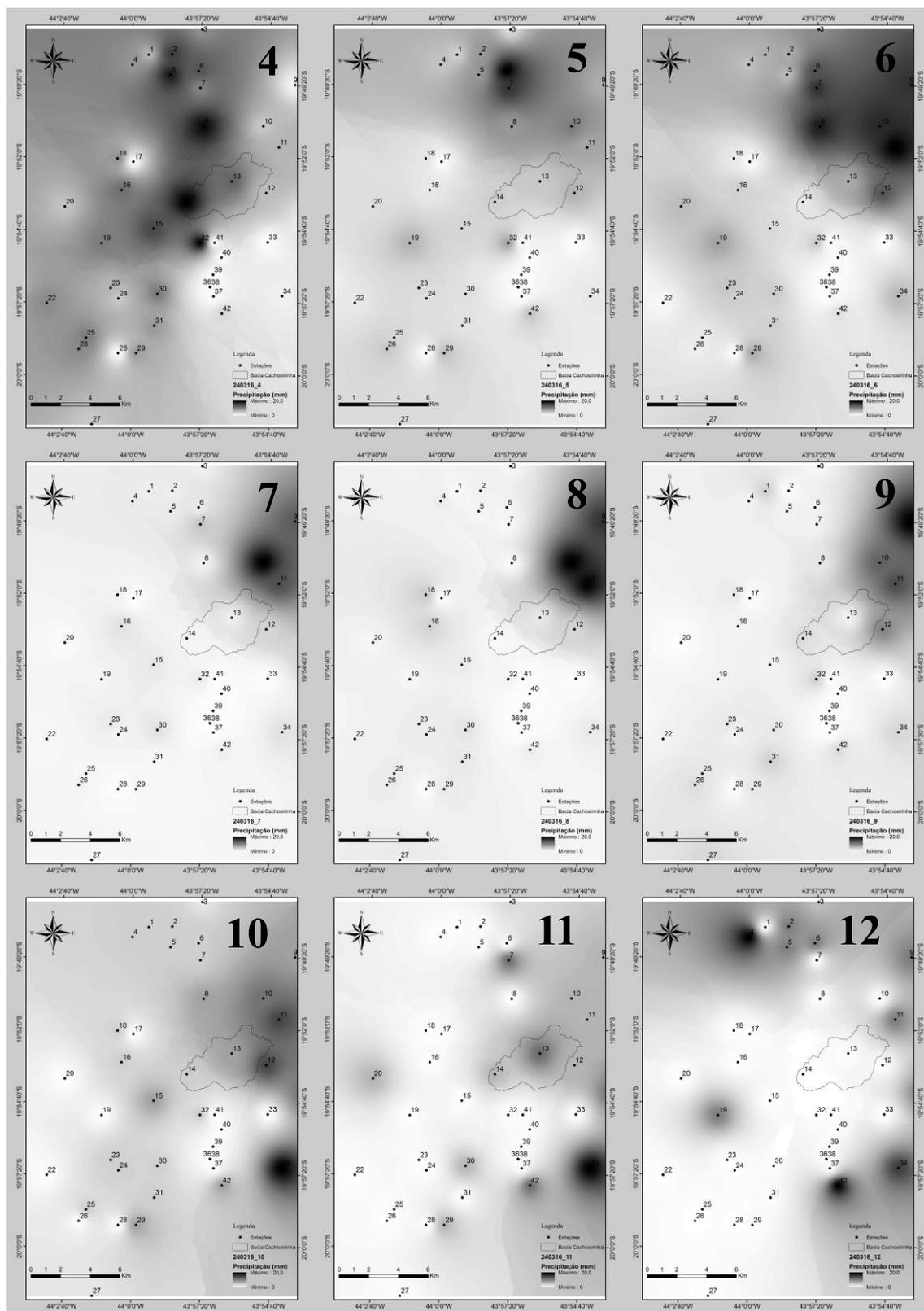


Figura 12 - (4) Evento 24/03/16 40 min; (5) Evento 24/03/16 50 min; (6) Evento 24/03/16 60 min; (7) Evento 24/03/16 70 min; (8) Evento 24/03/16 80 min; (9) Evento 24/03/16 90 min; (10) Evento 24/03/16 100 min; (11) Evento 24/03/16 110 min; (12) Evento 24/03/16 120 min (continuação)

Evento 12/11/2016

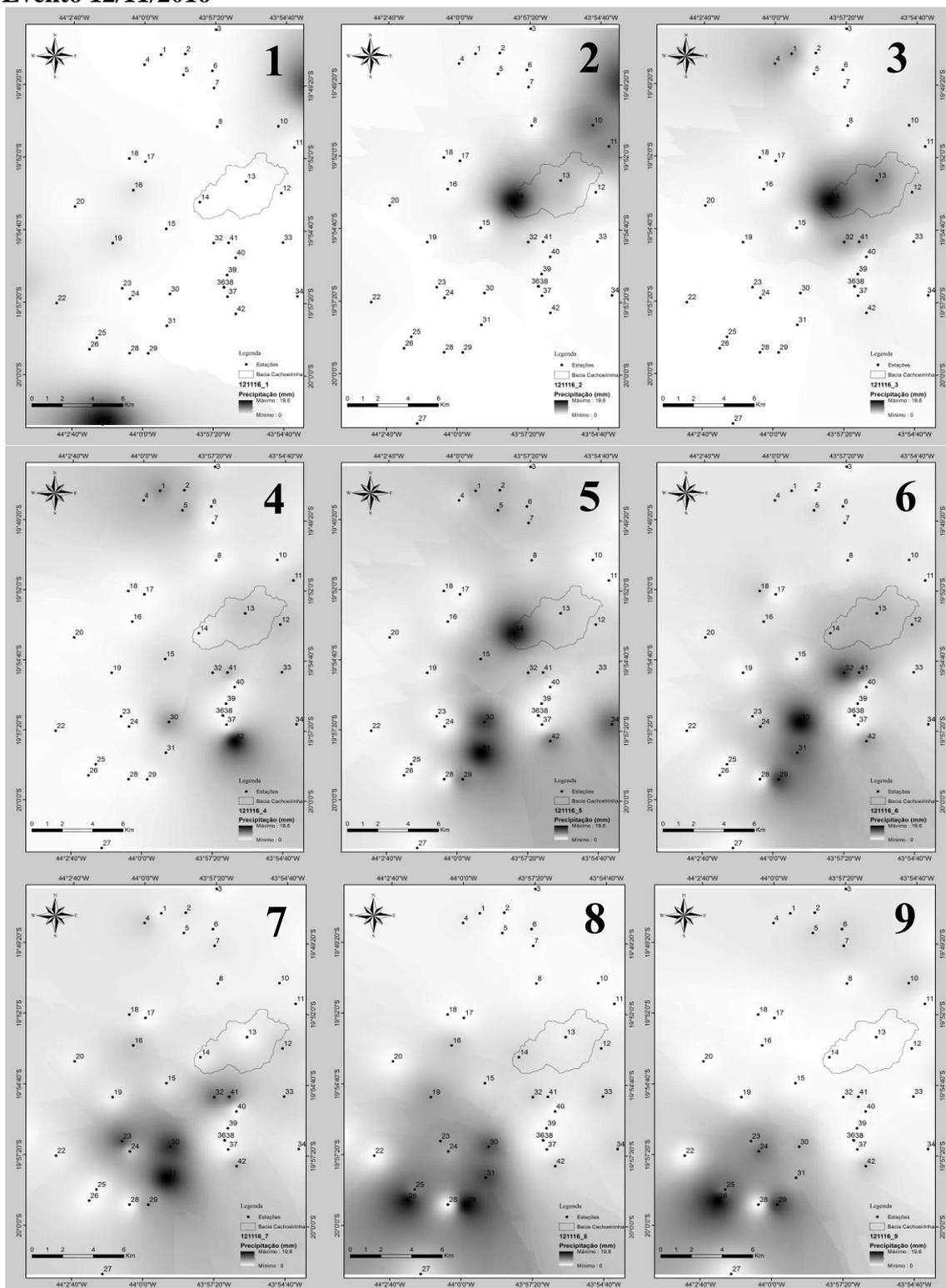


Figura 13 - (1) Evento 12/11/16 10 min; (2) Evento 12/11/16 20 min; (3) Evento 12/11/16 30 min; (4) Evento 12/11/16 40 min; (5) Evento 12/11/16 50 min; (6) Evento 12/11/16 60 min; (7) Evento 12/11/16 70 min; (8) Evento 12/11/16 80 min; (9) Evento 12/11/16 90 min (continua)

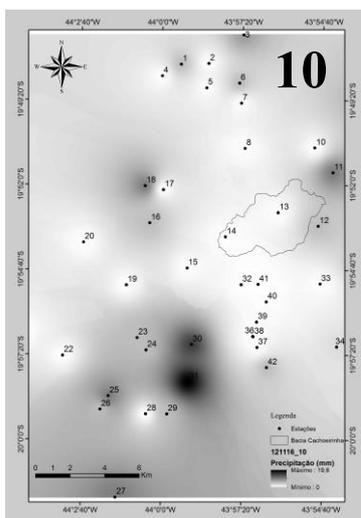


Figura 13 - (10) Evento 12/11/16 100 min (continuação)

Evento 19/03/2017

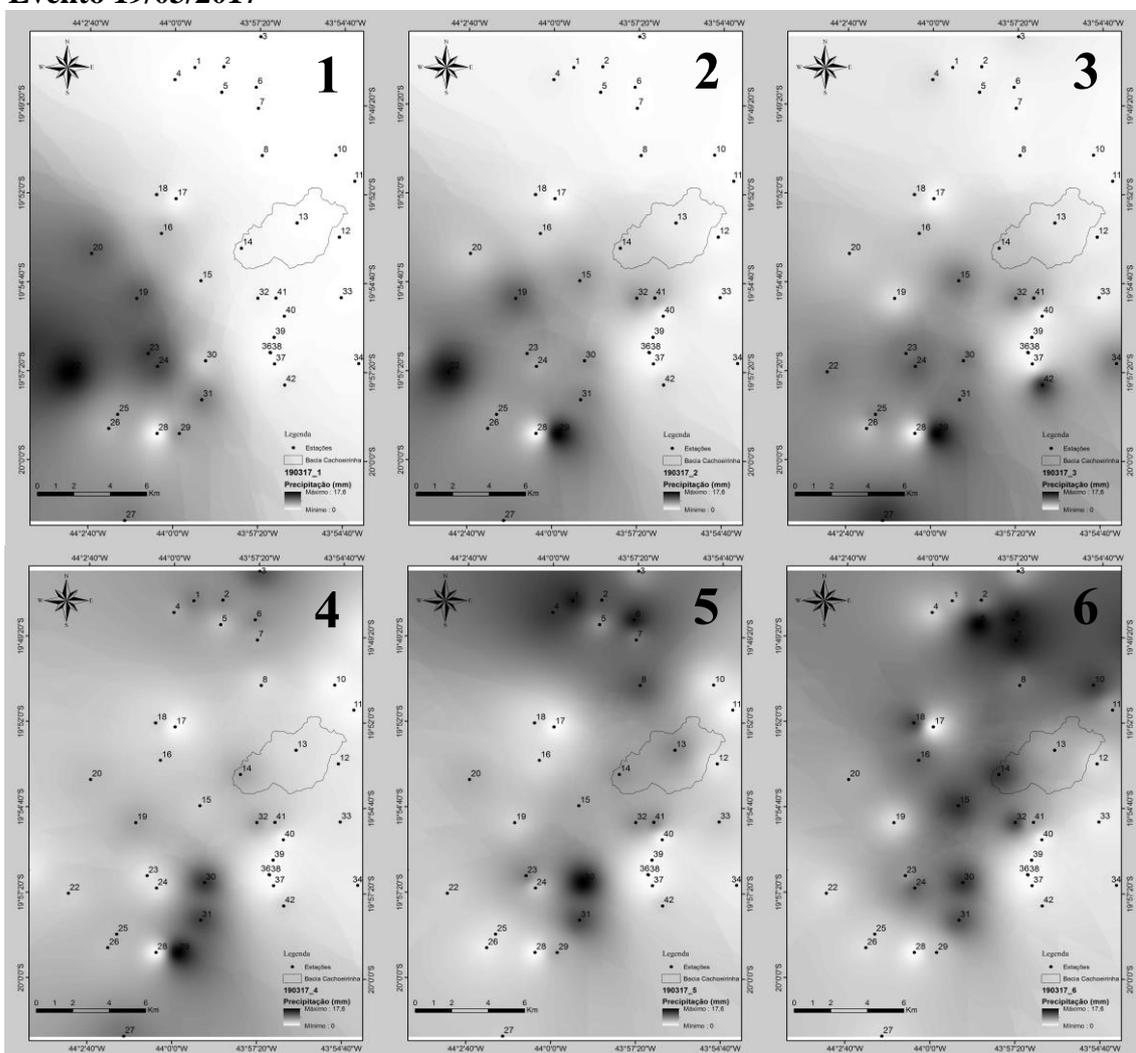


Figura 14 - (1) Evento 19/03/17 10 min; (2) Evento 19/03/17 20 min; (3) Evento 19/03/17 30 min; (4) Evento 19/03/17 40 min; (5) Evento 19/03/17 50 min; (6) Evento 19/03/17 60 min (continua)

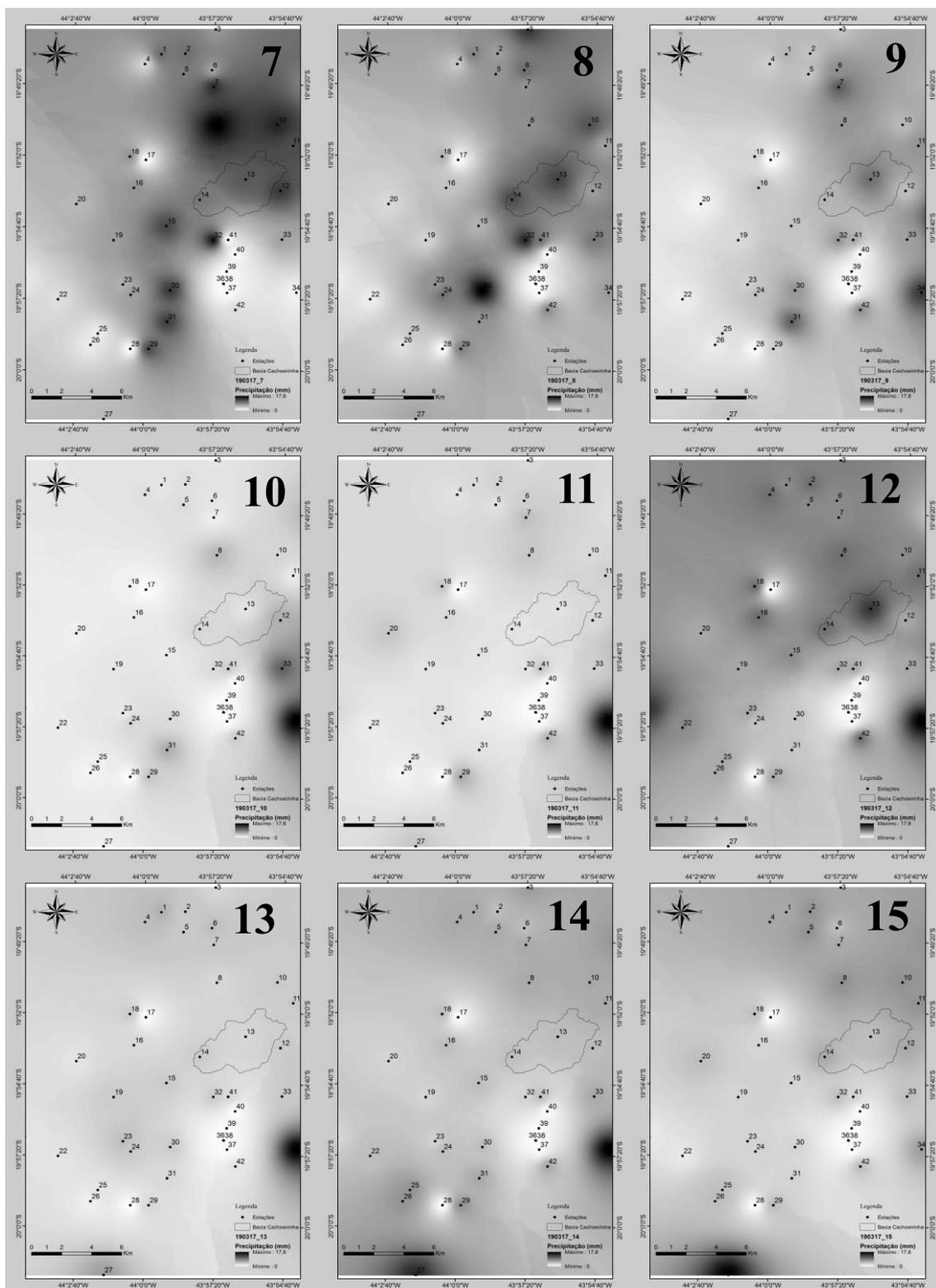


Figura 14 - (7) Evento 19/03/17 70 min; (8) Evento 19/03/17 80 min; (9) Evento 19/03/17 90 min; (10) Evento 19/03/17 100 min; (11) Evento 19/03/17 110 min; (12) Evento 19/03/17 120 min; (13) Evento 19/03/17 130 min; (14) Evento 19/03/17 140 min; (15) Evento 19/03/17 150 min
(continua)

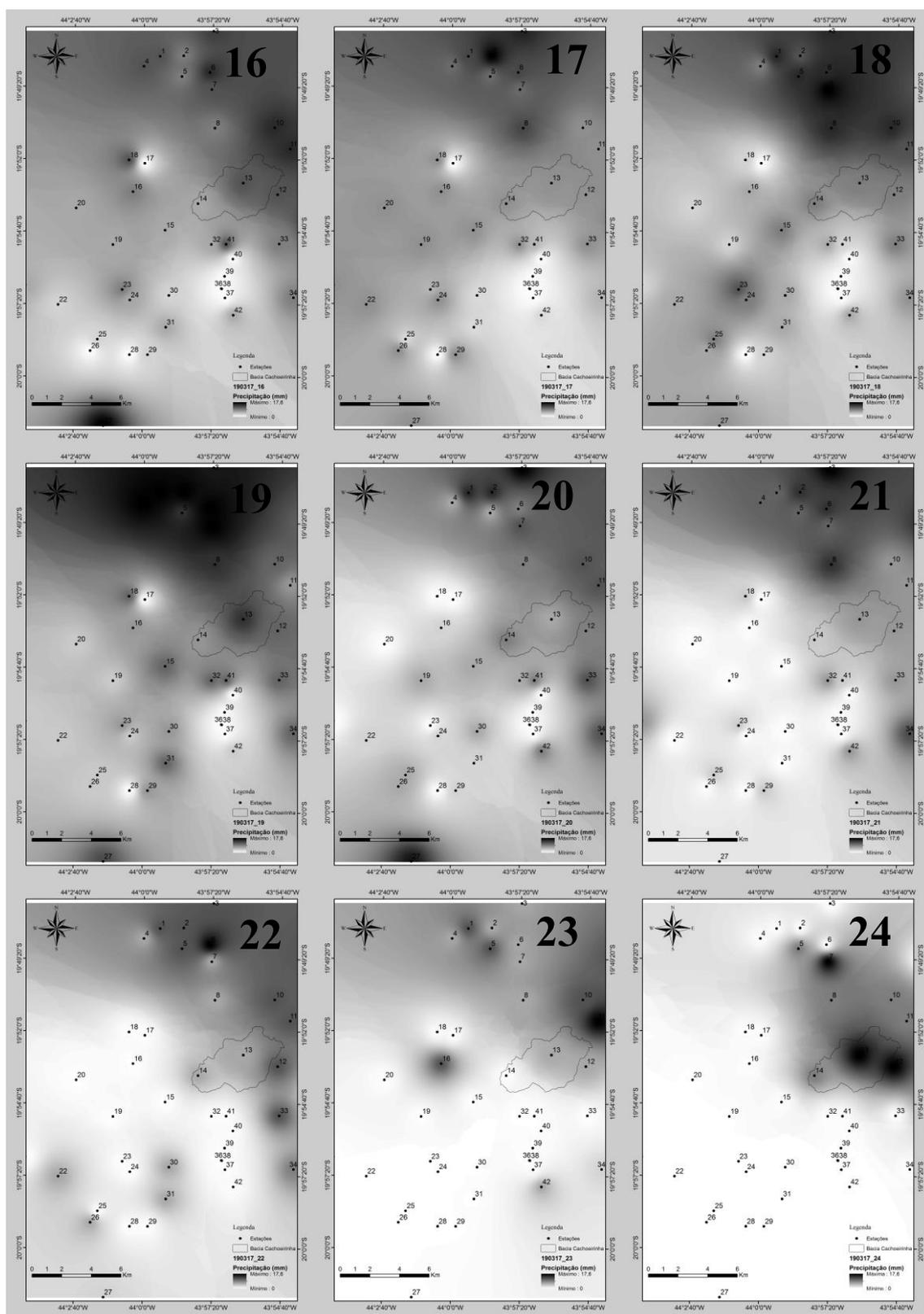


Figura 14 - (16) Evento 19/03/17 160 min; (17) Evento 19/03/17 170 min; (18) Evento 19/03/17 180 min; (19) Evento 19/03/17 190 min; (20) Evento 19/03/17 200 min; (21) Evento 19/03/17 210 min; (22) Evento 19/03/17 220 min; (23) Evento 19/03/17 230 min; (24) Evento 19/03/17 240 (continua)

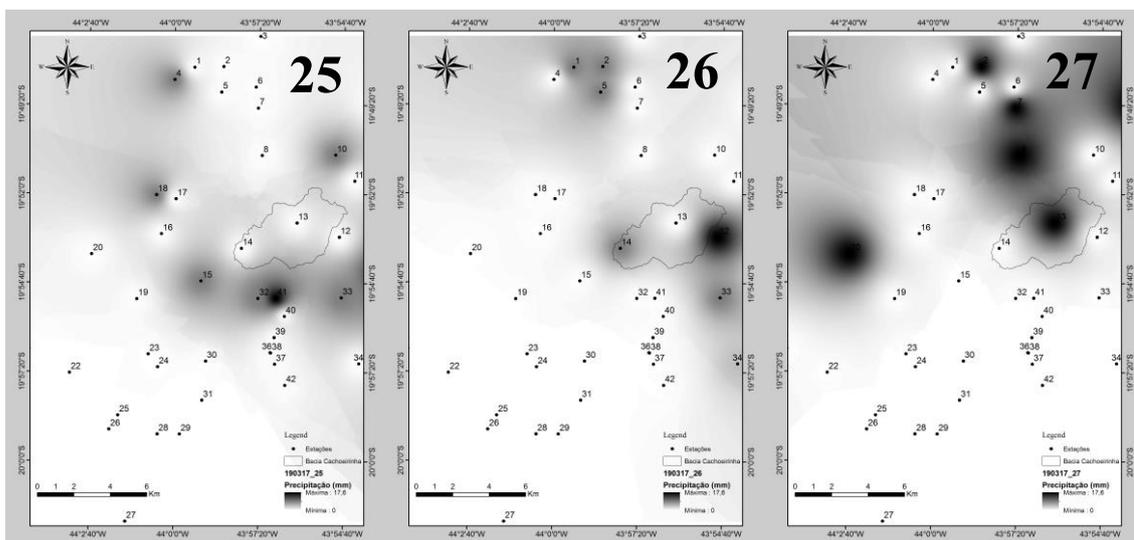


Figura 14 - (25) Evento 19/03/17 250 min; (26) Evento 19/03/17 260 min; (27) Evento 19/03/17 270 min (continuação)

Evento 05/03/2018 - evento 1

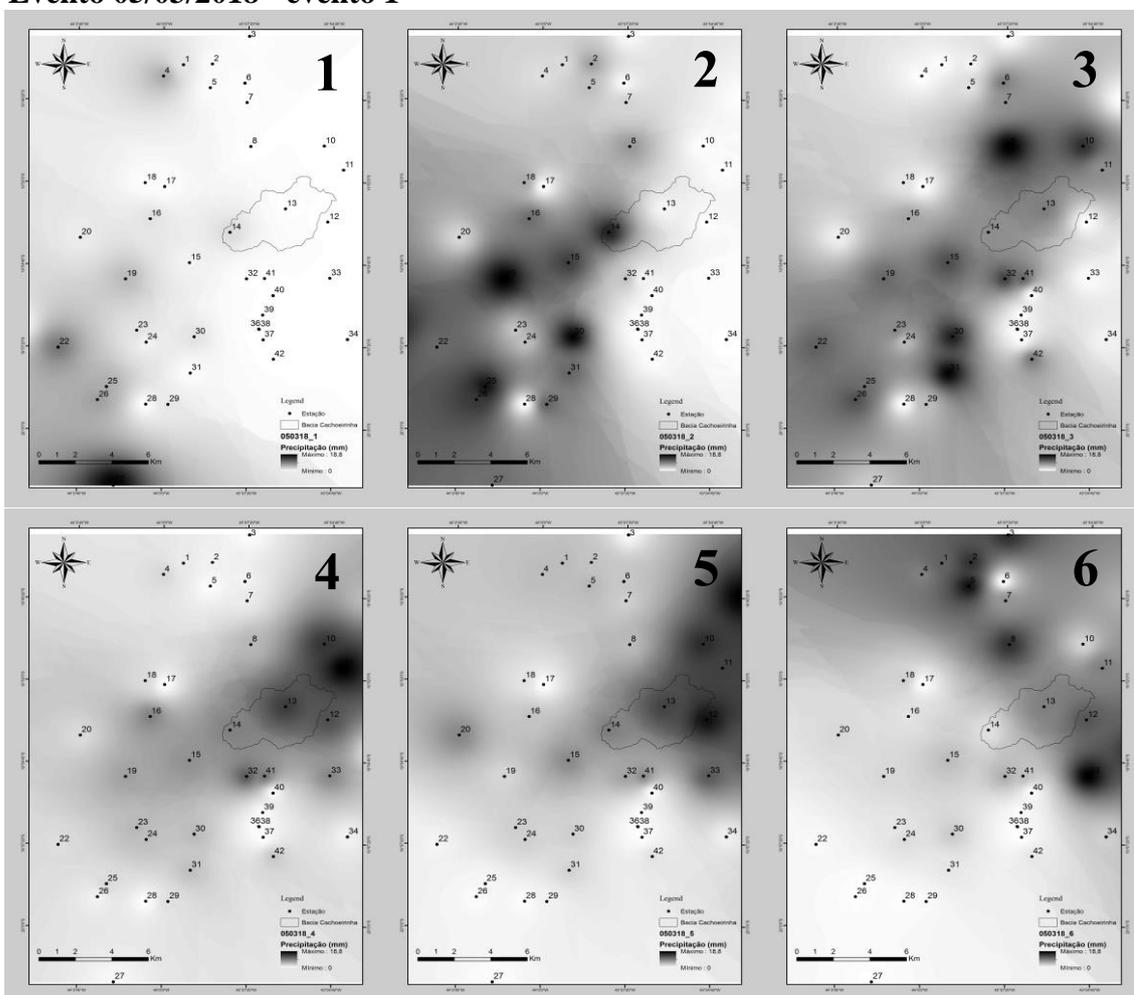


Figura 15 - (1) Evento 05/03/18 10 min; (2) Evento 05/03/18 20 min; (3) Evento 05/03/18 30 min; (4) Evento 05/03/18 40 min; (5) Evento 05/03/18 50 min; (6) Evento 05/03/18 60 min (continua)

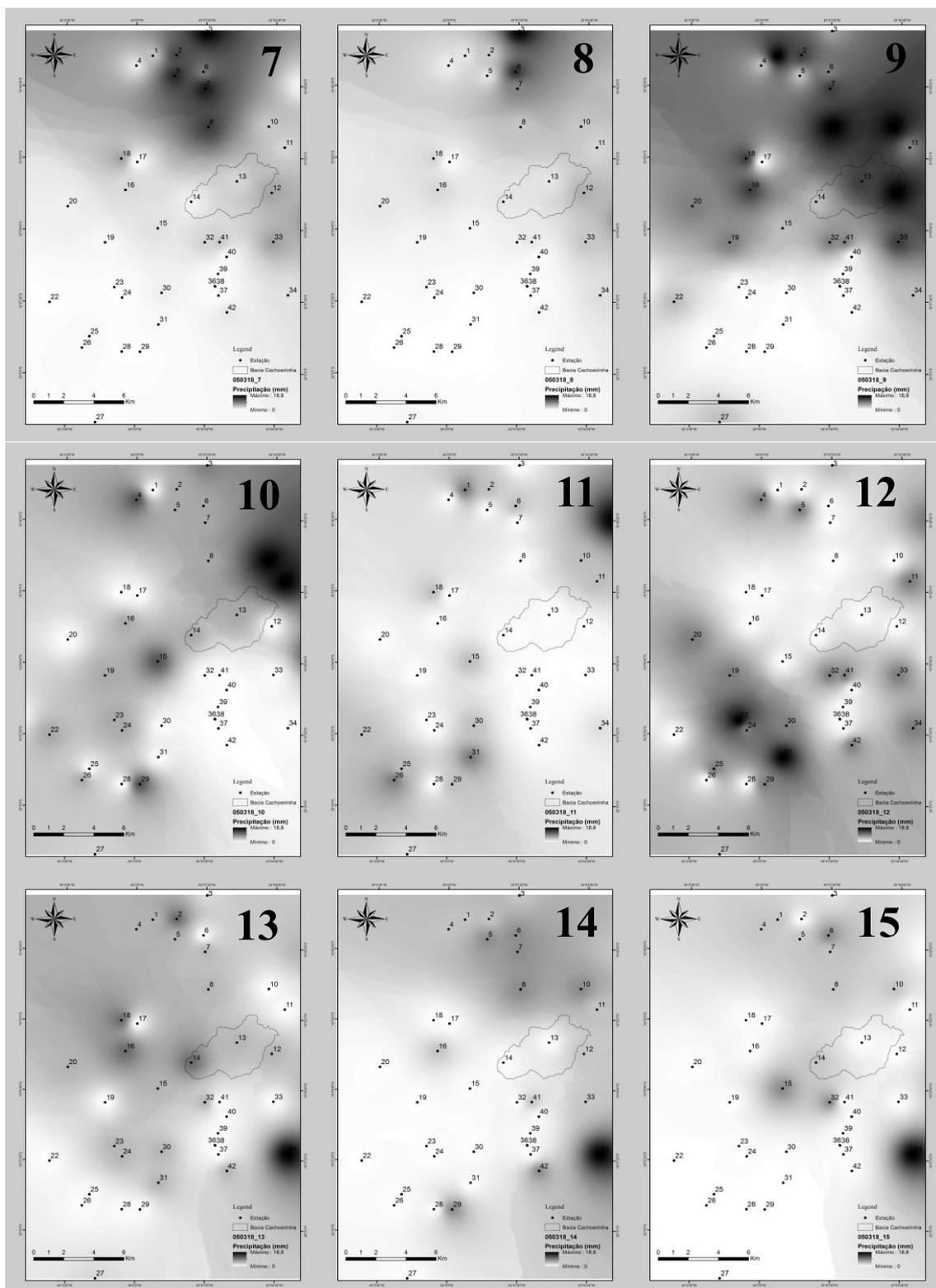


Figura 15 - (7) Evento 05/03/18 70 min; (8) Evento 05/03/18 80 min; (9) Evento 05/03/18 90 min; (10) Evento 05/03/18 100 min; (11) Evento 05/03/18 110 min; (12) Evento 05/03/18 120 min; (13) Evento 05/03/18 130 min; (14) Evento 05/03/18 140 min; (15) Evento 05/03/18 150 min (continuação)

Evento 16/03/2018

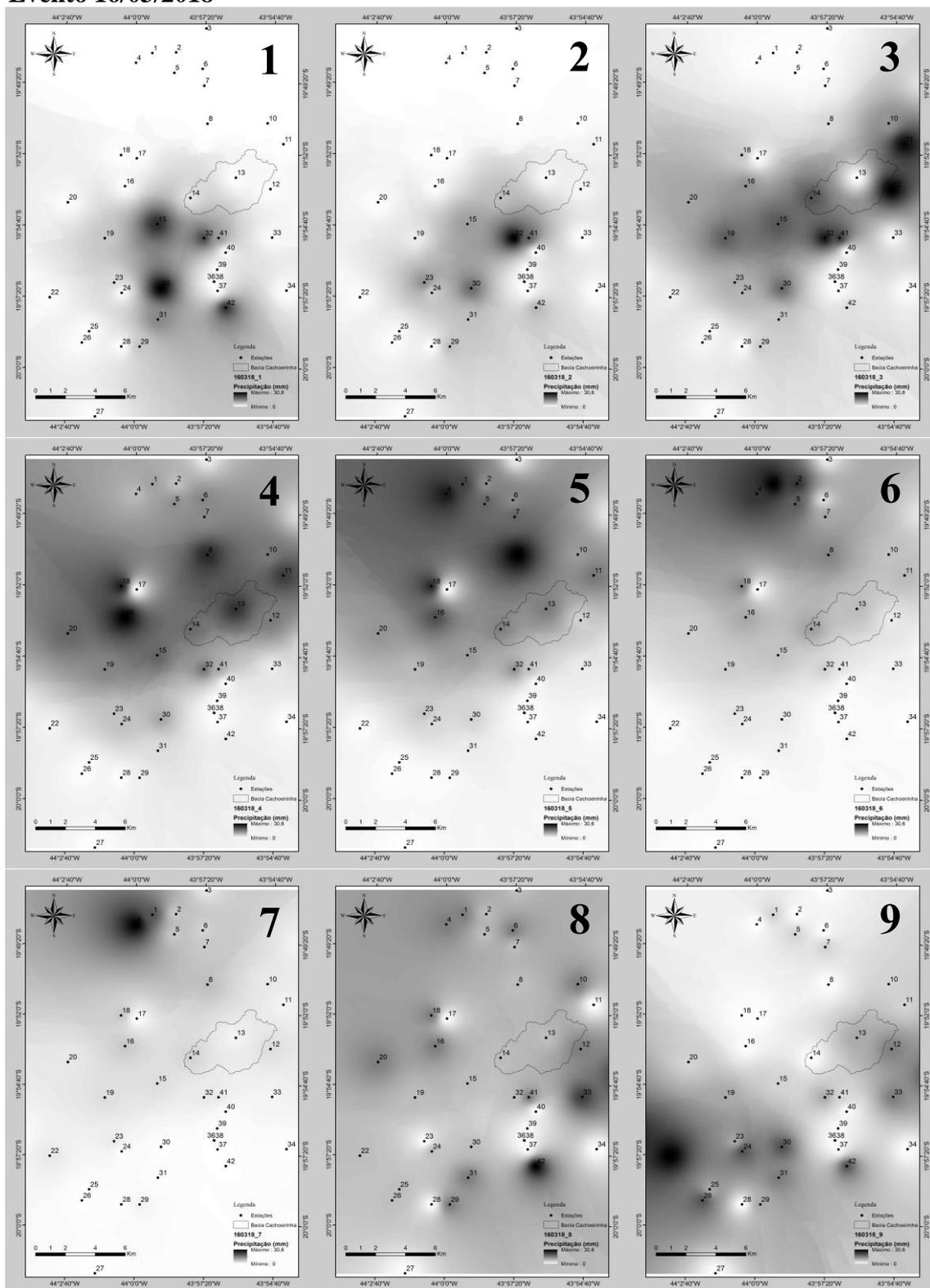


Figura 16 - (1) Evento 16/03/18 10 min; (2) Evento 16/03/18 20 min; (3) Evento 16/03/18 30 min; (4) Evento 16/03/18 40 min; (5) Evento 16/03/18 50 min; (6) Evento 16/03/18 60 min; (7) Evento 16/03/18 70 min; (8) Evento 16/03/18 80 min; (9) Evento 16/03/18 90 min (continua)

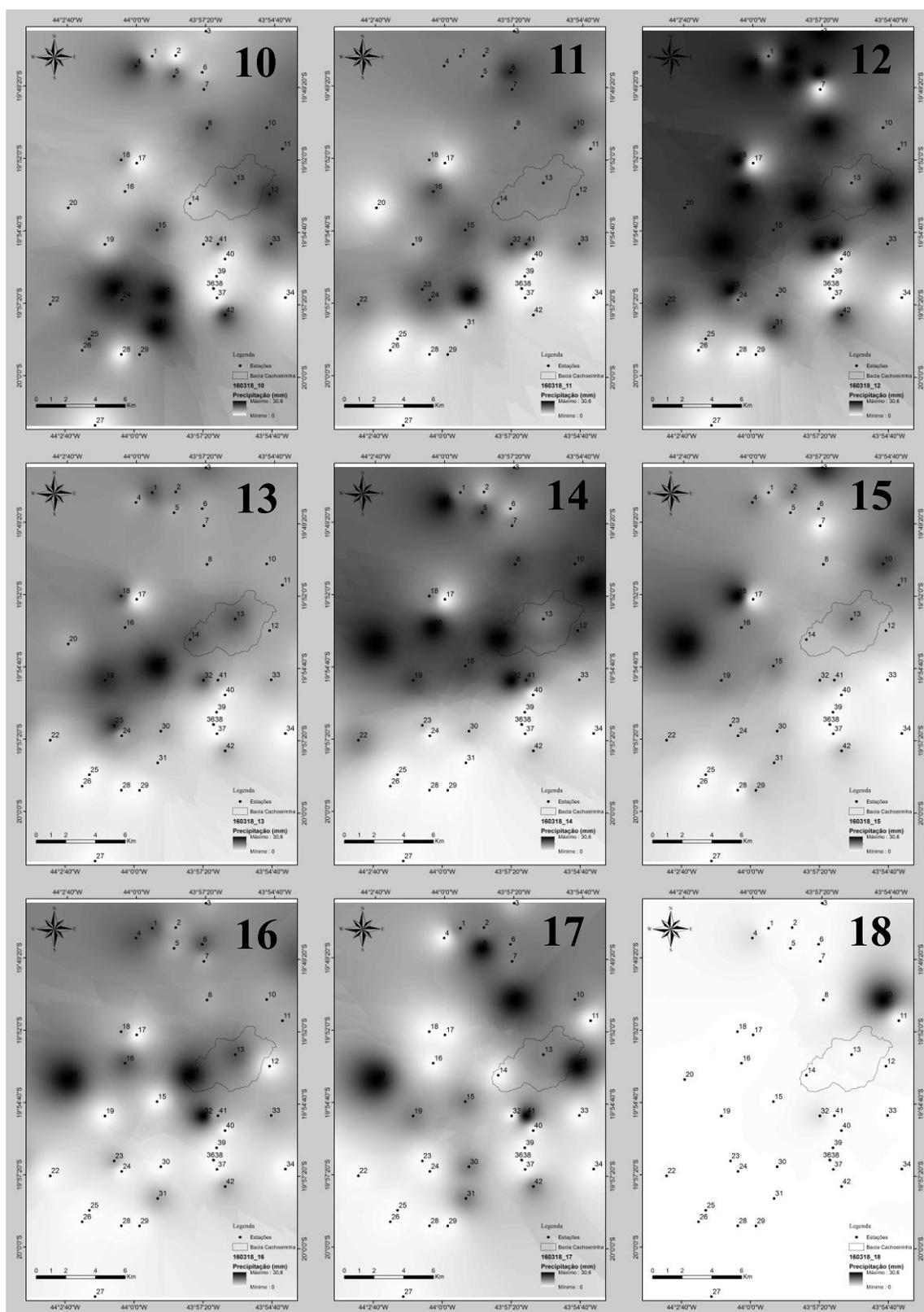


Figura 16 - (1) Evento 16/03/18 10 min; (2) Evento 16/03/18 20 min; (3) Evento 16/03/18 30 min; (4) Evento 16/03/18 40 min; (5) Evento 16/03/18 50 min; (6) Evento 16/03/18 60 min; (7) Evento 16/03/18 70 min; (8) Evento 16/03/18 80 min; (9) Evento 16/03/18 90 min (continua)

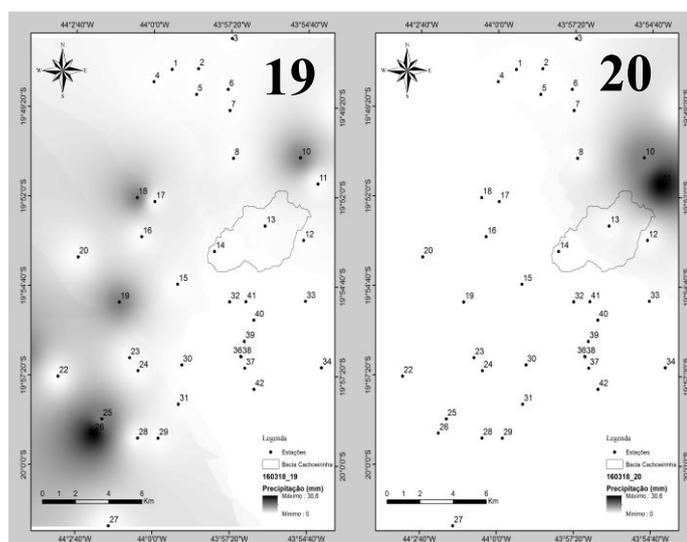


Figura 16 - (19) Evento 16/03/18 190 min; (20) Evento 16/03/18 200 min (continuação)

Evento 19/10/2018

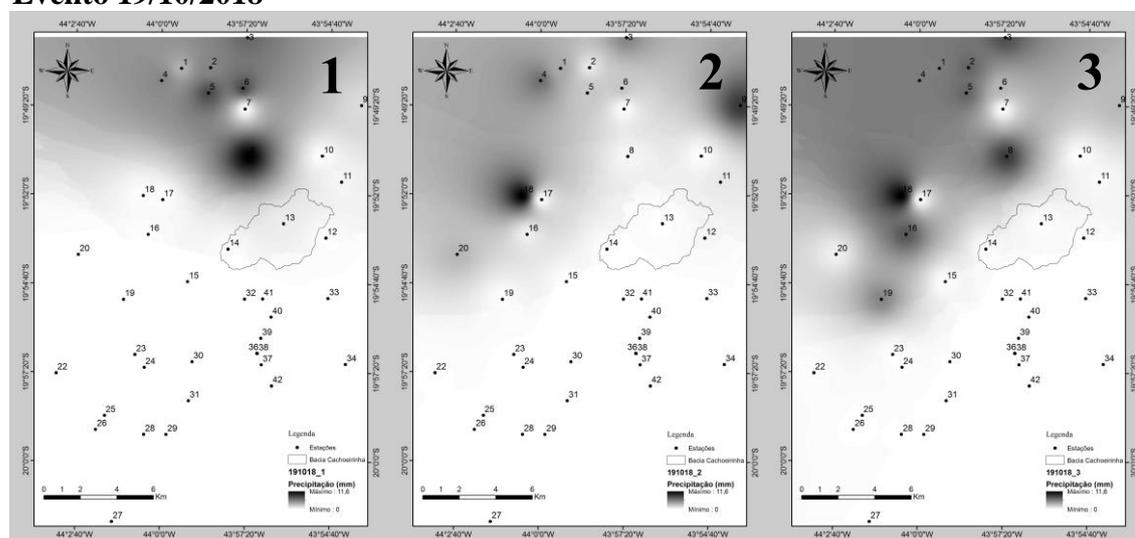


Figura 17 - (1) Evento 19/10/18 10 min; (2) Evento 19/10/18 20 min; (3) Evento 19/10/18 30 min (continua)

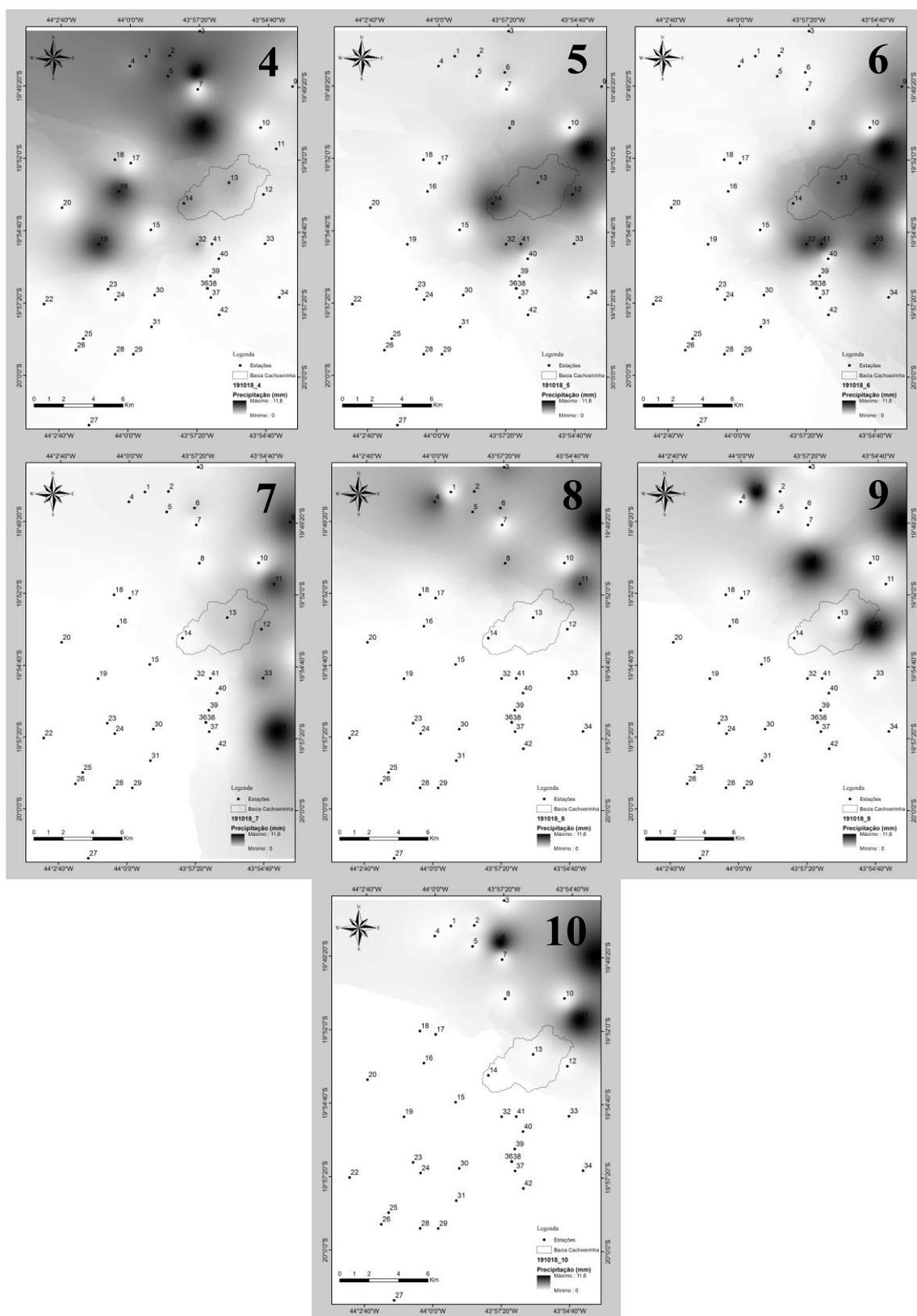


Figura 17 - (4) Evento 19/10/18 40 min; (5) Evento 19/10/18 50 min; (6) Evento 19/10/18 60 min; (7) Evento 19/10/18 70 min; (8) Evento 19/10/18 80 min; (9) Evento 19/10/18 90 min; (10) Evento 19/10/18 100 min (continuação)

Evento 05/02/2019

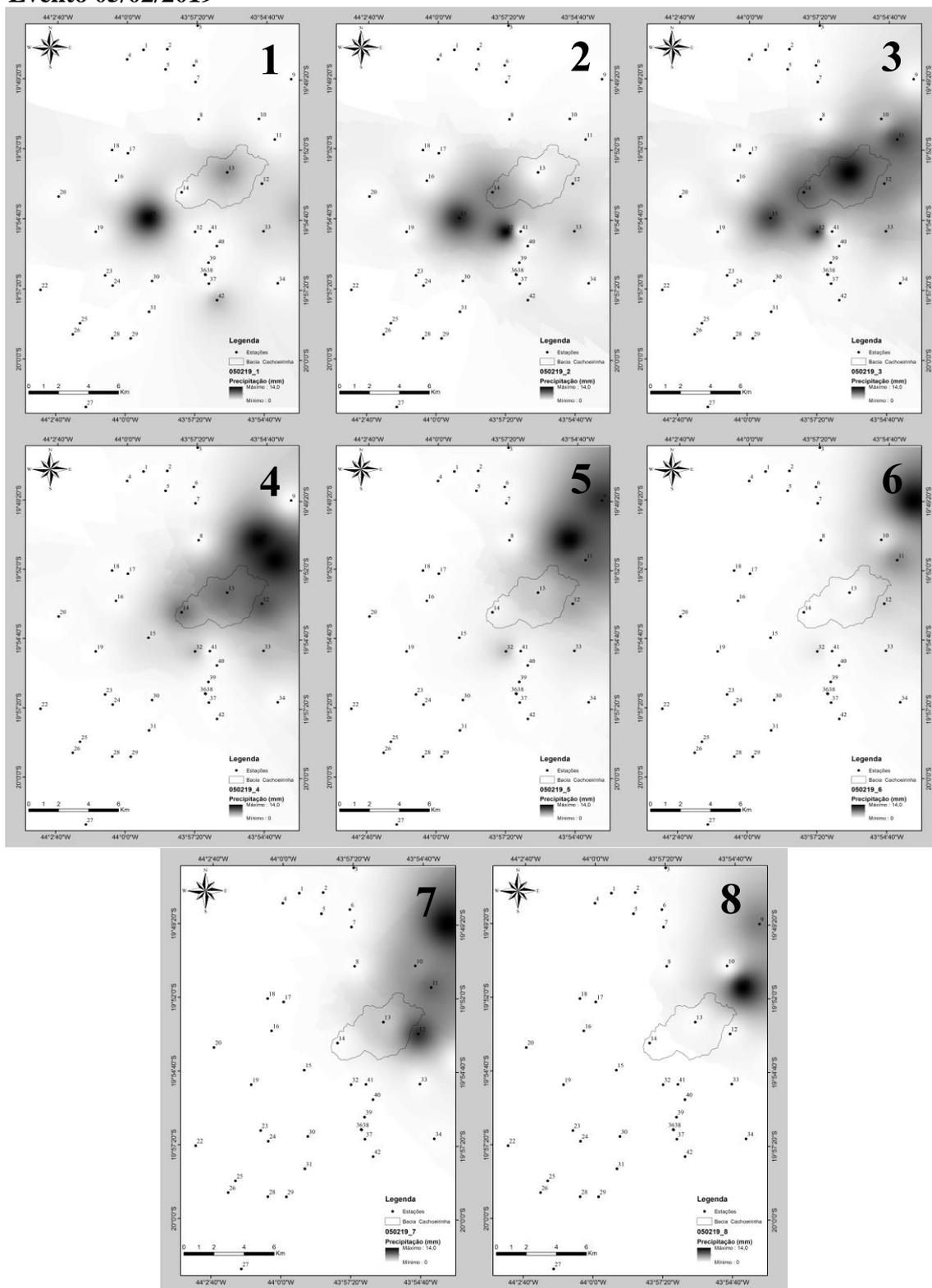


Figura 18 - (1) Evento 05/02/19 10 min; (2) Evento 05/02/19 20 min; (3) Evento 05/02/19 30 min; (4) Evento 05/02/19 40 min; (5) Evento 05/02/19 50 min; (6) Evento 05/02/19 60 min; (7) Evento 05/02/19 70 min; (8) Evento 05/02/19 80 min

Evento 17/02/2019 - evento 2

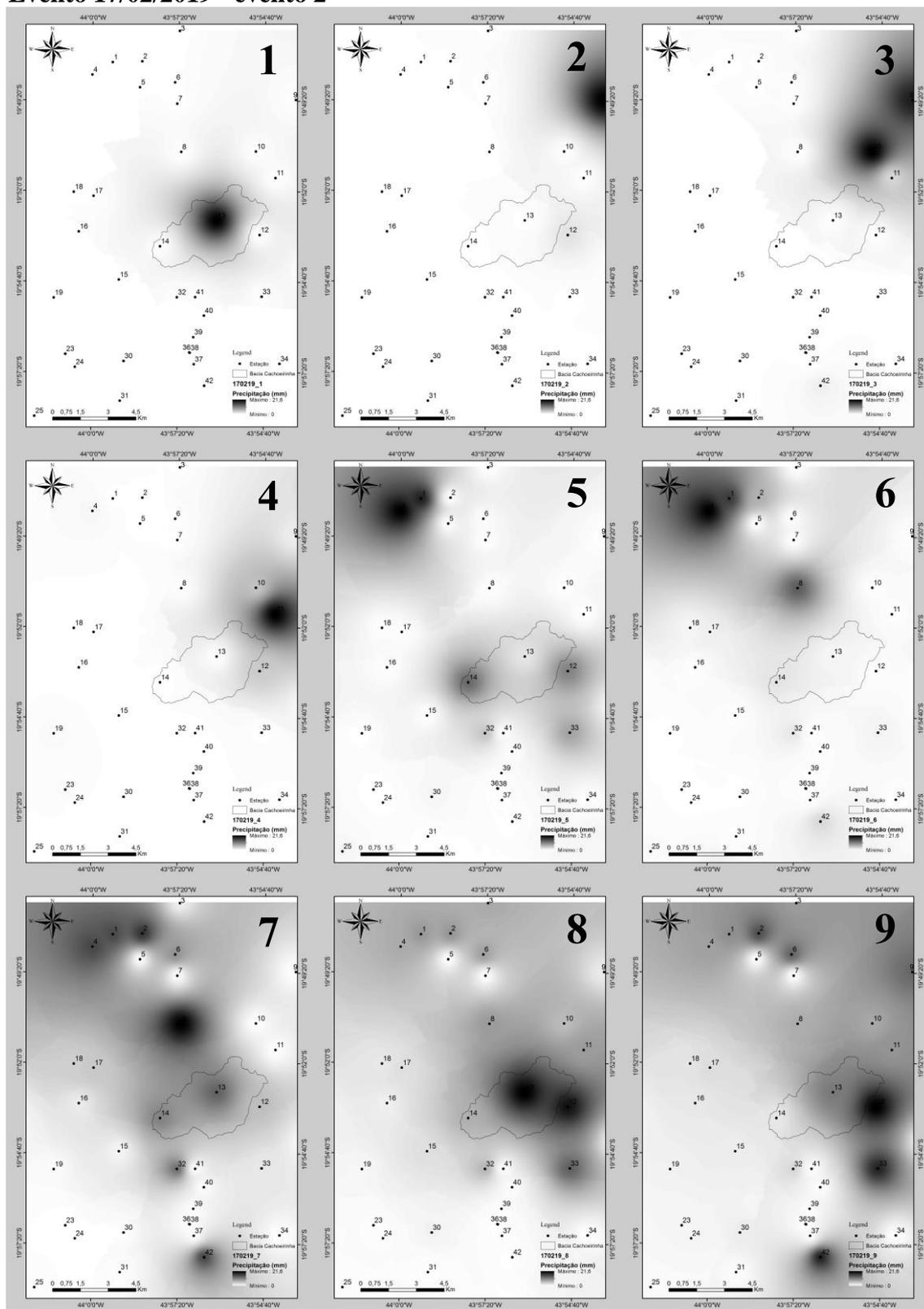


Figura 19 - (1) Evento 17/02/19 10 min; (2) Evento 17/02/19 20 min; (3) Evento 17/02/19 30 min; (4) Evento 17/02/19 40 min; (5) Evento 17/02/19 50 min; (6) Evento 17/02/19 60 min; (7) Evento 17/02/19 70 min (continua)

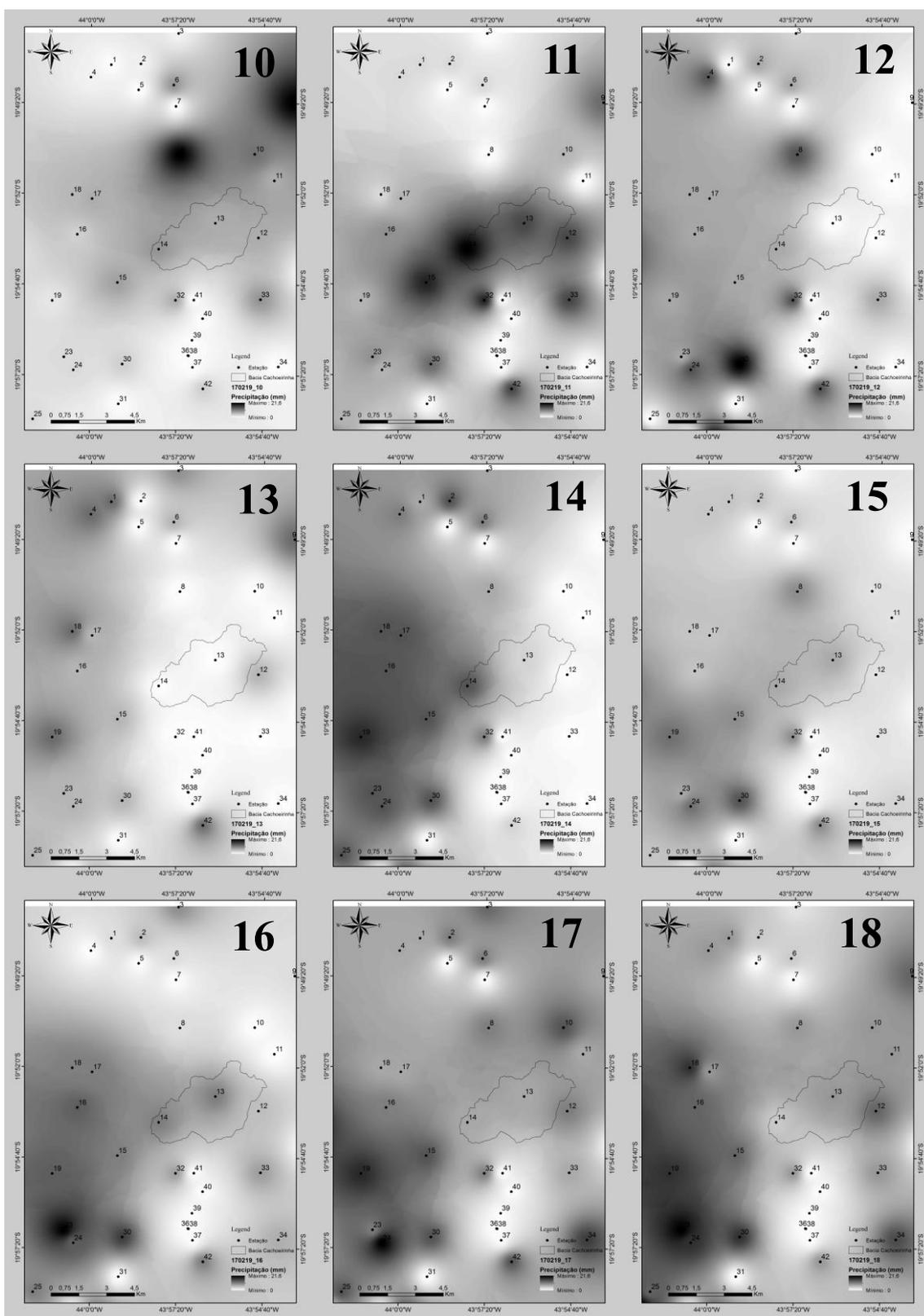


Figura 19 - (10) Evento 17/02/19 100 min; (11) Evento 17/02/19 110 min; (12) Evento 17/02/19 120 min; (13) Evento 17/02/19 130 min; (14) Evento 17/02/19 140 min; (15) Evento 17/02/19 150 min; (16) Evento 17/02/19 160 min; (17) Evento 17/02/19 170 min; (18) Evento 17/02/19 180 min (continua)

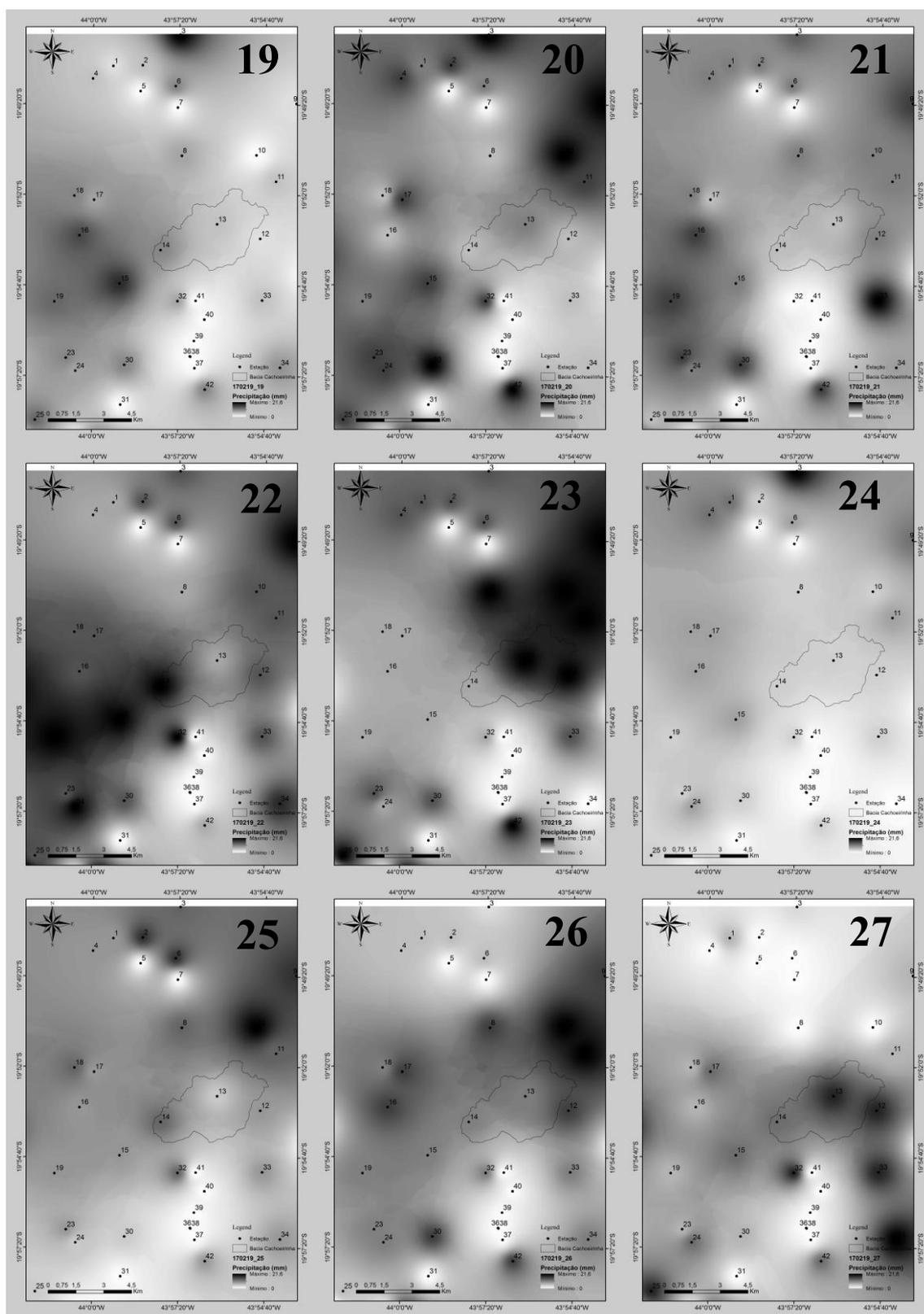


Figura 19 - (19) Evento 17/02/19 190 min; (20) Evento 17/02/19 200 min; (21) Evento 17/02/19 210 min; (22) Evento 17/02/19 220 min; (23) Evento 17/02/19 230 min; (24) Evento 17/02/19 240 min; (25) Evento 17/02/19 250 min; (26) Evento 17/02/19 260 min; (27) Evento 17/02/19 270 min (continua)

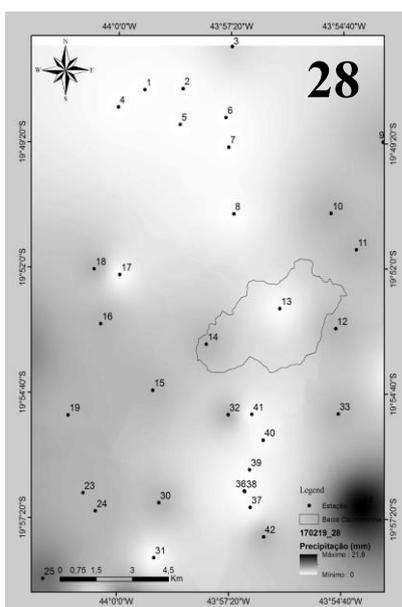
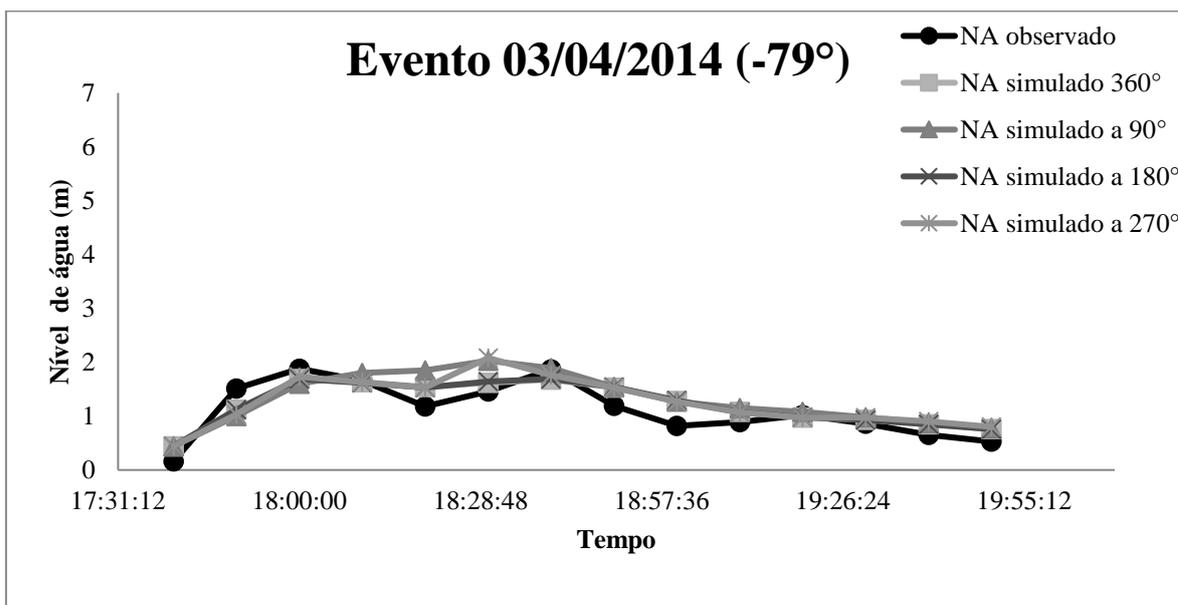
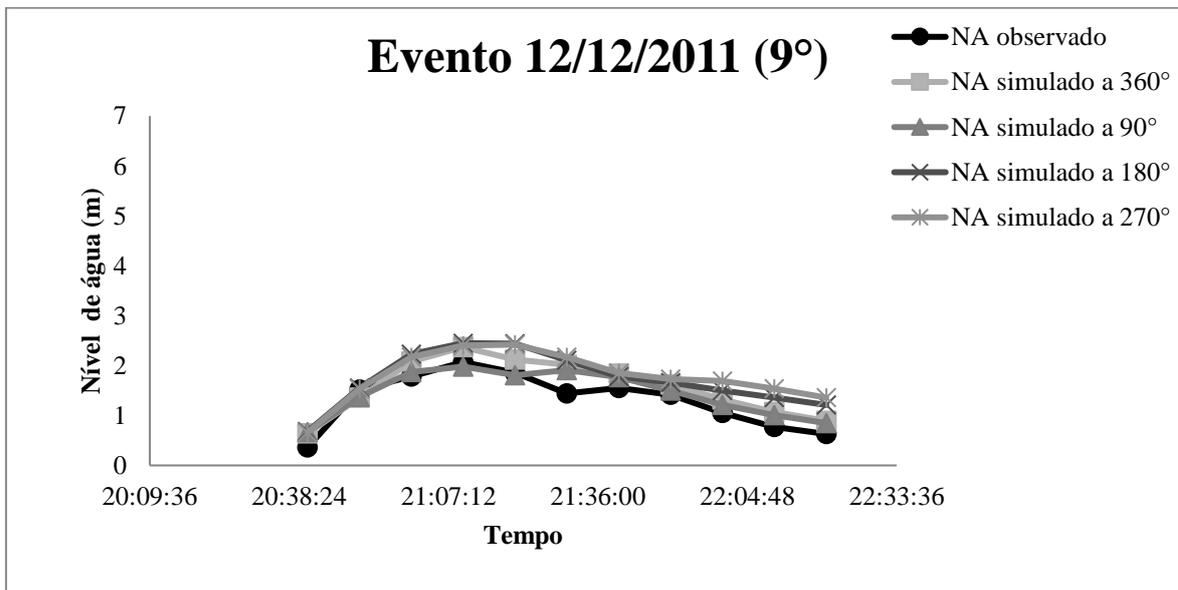


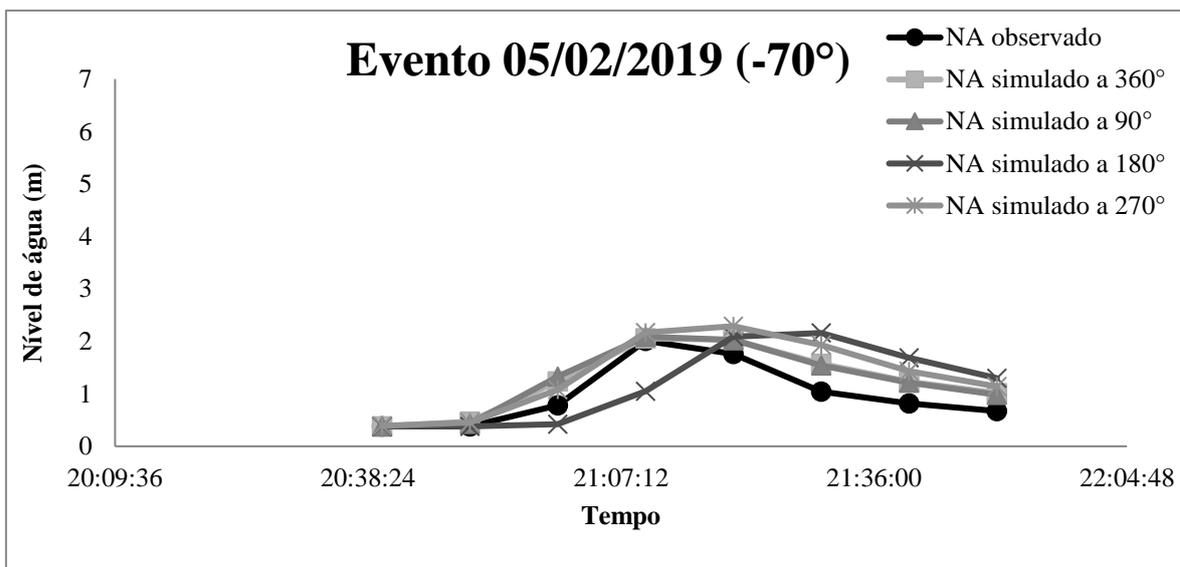
Figura 19 - (28) Evento 17/02/19 280 min (continuação)

**APÊNDICE C: GRÁFICOS DOS EVENTOS SINTÉTICOS PARA OS
RESPECTIVOS ÂNGULOS DE ROTAÇÃO 360°, 90°, 180° E 270°**

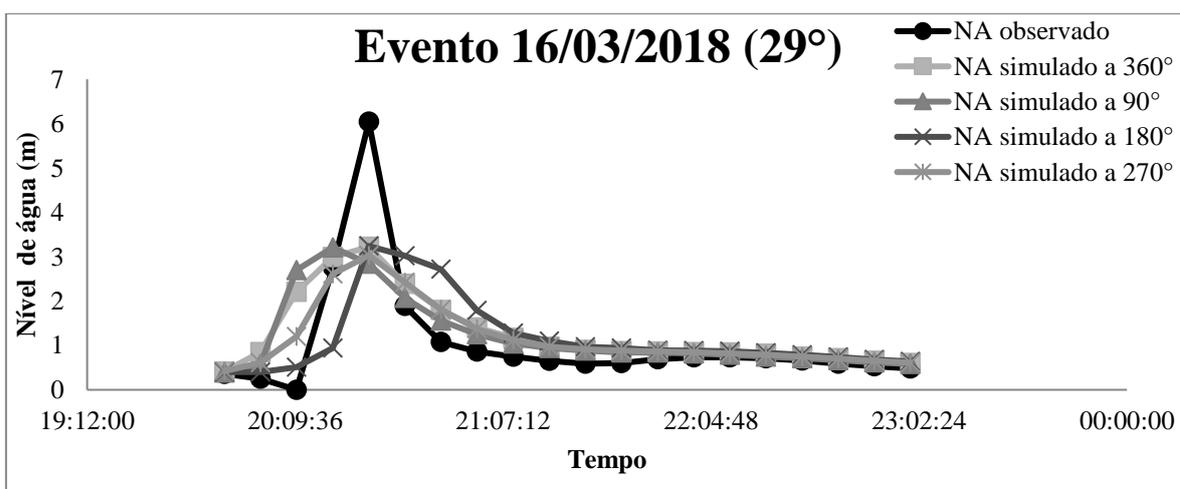
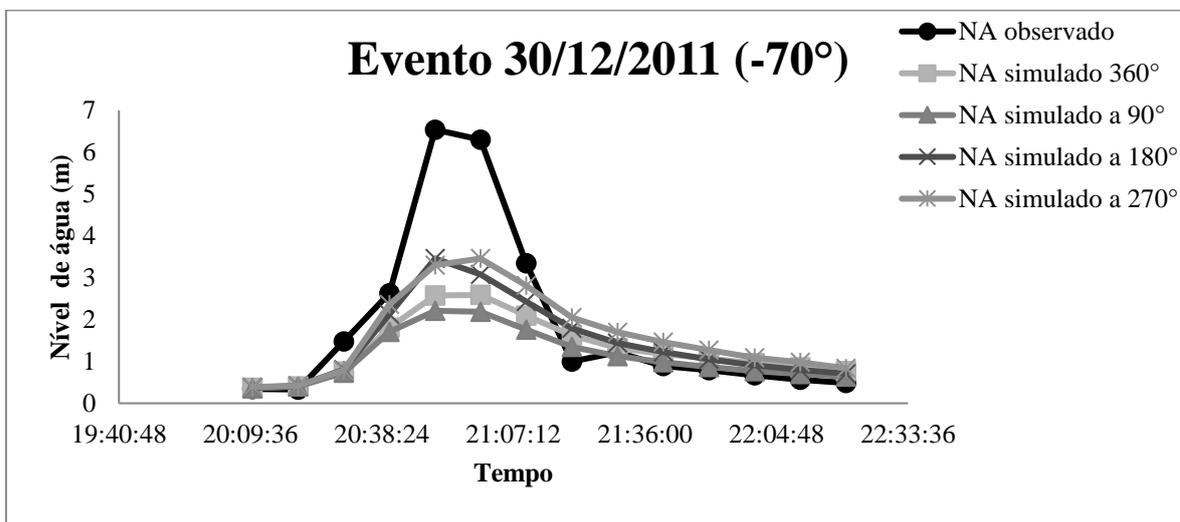
A separação dos gráficos em, eventos que não emitiram alerta, alerta vermelho, alerta laranja e alerta amarelo foi com relação ao alerta emitido do nível de água observado.

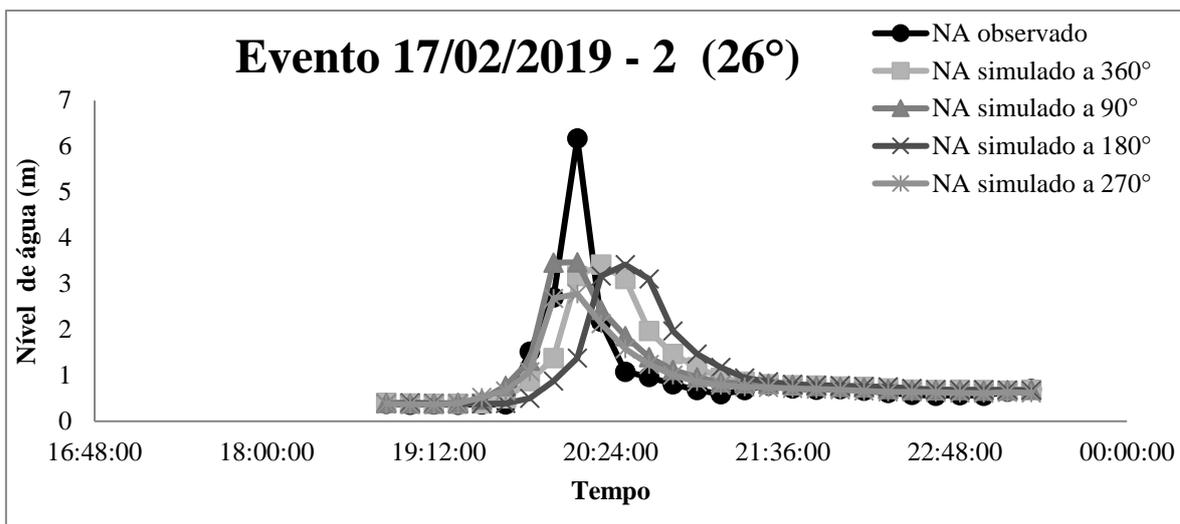
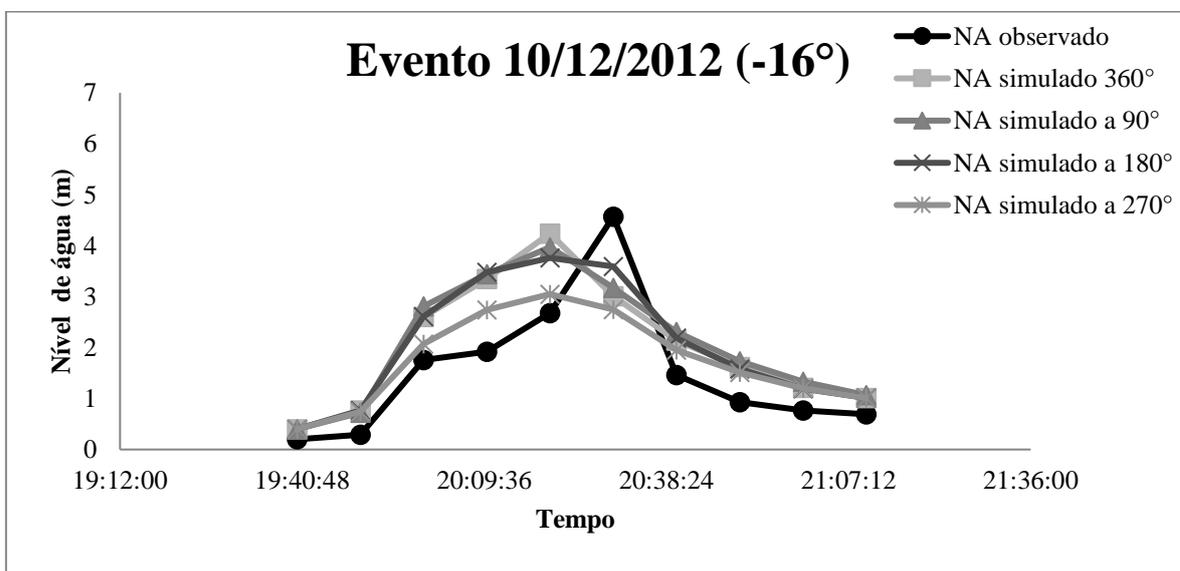
EVENTOS QUE NÃO EMITIRAM ALERTA





ALERTA VERMELHO



**ALERTA LARANJA****ALERTA AMARELO**