

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM RECURSOS HÍDRICOS
E SANEAMENTO



GEIZA THAMIRYS CORREIA GOMES

**Erros na Estimativa de Eventos Extremos de Vazão usando
Precipitação Estimada por Radar**

Maceió
2018

GEIZA THAMIRYS CORREIA GOMES

**Erros na Estimativa de Eventos Extremos de Vazão usando
Precipitação Estimada por Radar**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Ruberto
Fragoso Júnior.

Maceió
2018

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central
Divisão de Tratamento Técnico
Bibliotecário: Marcelino de Carvalho

G633e Gomes, Geiza Thamirys Correia.
Erros na estimativa de eventos extremos de vazão usando precipitação estimada por radar / Geiza Thamirys Correia Gomes. – 2019.
54 f. : il.

Orientador: Carlos Ruberto Fragoso Júnior.
Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Maceió, 2018.

Bibliografia: f. 50-54.

1. Radar. 2. Plan Position Indicator (PPI). 3. Constant Altitude Plan Position Indicator (CAPPI). 4. Dupla polarização. 5. Vazões naturais.
6 Precipitação (Meteorologia). I. Título.

CDU:551.501.8:556:12



Folha de Aprovação

GEIZA THAMIRYS CORREIA GOMES

ERROS NA ESTIMATIVA DE EVENTOS EXTREMOS DE VAZÃO USANDO
PRECIPITAÇÃO ESTIMADA POR RADAR

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, como requisito para obtenção do título de Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento.

Em: 14 / 11 / 2018

Prof. Dr. Carlos Roberto Fragoso Junior
(Orientador - PPGRHS/CTEC/UFAL)

Banca examinadora:

Prof.^a Dr.^a Cleuda Custódio Freire
(Examinadora interna - PPGRHS/CTEC/UFAL)

Prof. Dr. Marllus Gustavo Ferreira Passos das Neves
(Examinador externo - PPGRHS/CTEC/UFAL)

Prof. Dr. Benedito Cláudio da Silva
(Examinador externo - UNIFEI)

RESUMO

A disponibilidade em tempo real e a alta resolução espaço-temporal das estimativas de precipitação promovidas por radar meteorológico tendem a melhorar a estimativa de eventos extremos de cheia por modelos hidrológicos distribuídos, sobretudo, em bacias que apresentam descargas rápidas e carência de dados de chuva na escala temporal e espacial adequada. No entanto, tais estimativas continuam agregando uma importante fonte de incerteza para as previsões hidrológicas. Neste contexto, este trabalho avaliou os erros nas estimativas de eventos extremos de cheia de curto-prazo através de um modelo hidrológico distribuído, considerando diferentes formas de estimativas de precipitação por radar em uma bacia de clima tropical/semiárido, que apresenta frequentes eventos de cheia. Foram utilizados os produtos CAPPI e PPI para as estimativas de chuva por radar e o emprego de diferentes relações Z-R e dupla polarização. As relações Z-R locais desenvolvidas para Alagoas apresentaram o melhor desempenho na modelagem chuva-vazão. O produto CAPPI revelou-se promissor nas estimativas de vazão de curto prazo, enquanto que o produto PPI se mostrou inconsistente do ponto de vista físico. Além disso, para os eventos analisados a equação de dupla polarização não trouxe ganhos significativos para estimativa de chuva e, conseqüentemente, de vazão.

Palavras-chave: Z-R local; CAPPI; PPI; Dupla polarização; Vazões extremas.

ABSTRACT

The real-time availability and high spatial-temporal resolution of precipitation estimates promoted by meteorological radar tend to improve the estimation of extreme flood events by distributed hydrological models, especially in basins that present rapid discharges and lack of rainfall data in the appropriate temporal and spatial scale. However, such estimates continue to provide an important source of uncertainty for hydrological forecasts. In this context, this work evaluated the errors in the estimates of extreme short-term flood events through a distributed hydrological model, considering different forms of radar precipitation estimates in a tropical / semi-arid climate basin, which presents frequent flood events . CAPPI and PPI products were used for radar rain estimates and the use of different Z-R and double polarization relationships. The local Z-R relations developed for Alagoas presented the best performance in rainfall-flow modeling. The CAPPI product was promising in the short-term flow estimates, while the PPI product was physically inconsistent. In addition, for the analyzed events the double polarization equation did not bring significant gains for rainfall estimation and consequently flow.

Keywords: local Z-R; CAPPI; PPI; Double polarization; Extreme flow.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus queridos pais, pelo carinho e esforço para criar a mim e a meus irmãos com dignidade. Em especial, agradeço à minha mãe, sua perseverança e garra me foram exemplo e inspiração. Ao meu pai, que mesmo distante devido à sua profissão, jamais deixou de nos dar apoio e amor.

Agradeço a todos os meus familiares, especialmente aos meus irmãos, à minha avó Novinha por me inspirar com sua garra, e à querida Tia Zezé pelo apoio e carinho.

Ao meu orientador, Carlos Ruberto, de quem sou grande admiradora, agradeço por seu acolhimento, carinho e amizade.

Ao Programa de Apoio aos Estudantes das Escolas Públicas do Estado (PAESPE), por me dar a oportunidade de ingressar em um curso superior e sonhar com um futuro melhor.

Agradeço, em especial, ao prof. Roberaldo Souza, por ter me apoiado nas horas difíceis e por não desistir de me acompanhar em meus sonhos. Agradeço pelo privilégio de possuir sua amizade e carinho, que foram sustentação nessa caminhada longa e árdua. Seus ensinamentos estarão sempre presentes em minha vida. Agradeço por seu engajamento, dedicação, e amor à educação.

Agradeço também aos alunos e instrutores dos Projetos PAESPE e PAESPE JÚNIOR, o convívio com eles me traz amadurecimento e fomenta o desejo de continuar nesta ação social.

Meus agradecimentos, aos professores do PPGRHS, em especial, aos professores Cleuda Freire, Valmir Pedrosa e Vladimir Caramori, pela atenção e ensinamentos desde a época do meu ingresso no PAESPE.

Agradeço também à professora do ICAT, Natália Fedorova, pela atenção e orientações.

Agradeço aos colegas Klewerton Queiroz e Denis Duda pelas orientações e auxílio, fundamentais para a realização desta pesquisa.

Com carinho agradeço aos amigos Cayo Lopes, Clebson Carvalho e Ewerton Oliveira, pelo suporte para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também, aos colegas do PPGRHS, Cíntia Leite, Daniela Pereyra, Gedson Cunha, Maíra Menezes, Valquernei Jesus e Víctor Pontes, pelas discussões, troca de informações, e pela amizade. E aos colegas do PPGMET/UFAL, Bruno Teixeira, Italo Januário, Metheus Lyra, Osmar Toledo e Sylvania, pela amizade, esclarecimento de dúvidas e apoio.

Agradeço ao Cemaden pelo fornecimento dos dados, em especial, aos funcionários Jójhy Sakuragi e Samuellson Lopes pelo esclarecimento de dúvidas.

Por fim, agradeço à CAPES pela concessão da bolsa.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Composição de um CAPPI.	19
Figura 2 - Localização e caracterização da Bacia Hidrográfica do rio Mundaú (BHRM).	26
Figura 3 – Imagens do radar gerenciado pela APAC e imagens do satélite GOES.	30
Figura 4 – Localização das estações pluviométricas.	31
Figura 5 – Distribuição das mini-bacias e estações pluviométricas usadas na interpolação....	33
Figura 6 – Comparação entre as estimativas de chuva acumulada pelos produtos CAPPI e PPI e precipitação observada acumulada (mm).	36
Figura 7 – Probabilidade de detecção (POD) da chuva em diferentes estações pluviométricas.	37
Figura 8 – Razão de falso alarme (FAR) da chuva em diferentes estações pluviométricas. ...	37
Figura 9 – Razão de acurácia (AR) da chuva em diferentes estações pluviométricas.	37
Figura 10 – Evento 1: Estatísticas de quantificação.	38
Figura 11 – Evento 2: Estatísticas de quantificação.	39
Figura 12 – Malha do radar, (a) evento 1 e (b) evento 2.	39
Figura 13 – Isoietas usando: (a) estações horárias e (b) estações diárias.	40
Figura 14 – Comparação entre os hidrogramas simulados (gerados a partir dos produtos CAPPI) e observados para o evento 1.	41
Figura 15 – Comparação entre os hidrogramas simulados (gerados a partir dos produtos CAPPI) e observados para o evento 2.	41
Figura 16 – Simulação do hidrograma simulado após a análise de consistência nas estimativas de chuva do modelo PIT para o evento 2.	42
Figura 17 – Evento 1: Cenários gerados a partir do produto CAPPI, empregando $F_c=1,6$	42
Figura 18 – Evento 2: Cenários gerados a partir do produto CAPPI, empregando $F_c=1,6$	43
Figura 19 – Evento 1: Cenários gerados a partir do produto CAPPI, com a nova calibração automática.	44
Figura 20 – Evento 2: Cenários gerados a partir do produto CAPPI, com a nova calibração automática.	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Relações Z-R utilizadas pelo CEMADEN.....	18
Quadro 2 – Relações Z-R desenvolvidas para Alagoas.....	18
Quadro 3 – Eventos hidrológicos usados por Queiroz (2018).	27
Quadro 4 – Eventos hidrológicos de interesse.....	27
Quadro 5 – Descrição dos dados do radar.....	28
Quadro 6 - Quadro de contingência utilizada para o cálculo das estatísticas de ocorrência. ...	32
Quadro 7 – Calibração 1 e 2: Comparativo do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS).....	45
Quadro 8 – Evento 1: Comparação dos cenários, usando a nova calibração automática.	45
Quadro 9 – Evento 2: Comparação dos cenários, usando a nova calibração automática.	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
AR	Razão de acurácia
ASAS	Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul
BHRM	Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú
BIAS	Viés
CAPPI	Constant Altitude Plan Position Indicator
CCM	Complexos Convectivos de Mesoescala
CEMADEN	Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais
CJNEB	Corrente de Jato do Nordeste Brasileiro
CPTEC	Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos
DTG	Distribuição do Tamanho de Gota
FAR	Razão de falso alarme
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
Kdp	Diferencial do deslocamento de fase
NEB	Nordeste Brasileiro
NS	Nash–Sutcliffe
OL	Ondas de Leste
POA	Perturbações Ondulatórias no Campo dos Ventos Alísios
POD	Probabilidade de detecção
PPI	Plan Position Indicator
SEMARH	Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos
P1G	Modelo que emprega a Z-R Geral de Alagoas, produto CAPPI
P1K	Modelo que emprega a Z-R de Marshall-Palmer, produto CAPPI
P1R	Modelo que emprega a Z-R Geral de Alagoas, produto CAPPI, dupla polarização
P1T	Modelo que emprega as Z-R Estratiforme e Convectiva de Alagoas, produto CAPPI
PGE	Modelo que emprega a Z-R Geral de Alagoas, produto PPI
PMP	Modelo que emprega a Z-R de Marshall-Palmer, produto PPI
SF	Sistemas Frontais
VCAN	Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis
VCMN	Vórtices Ciclônicos de Médios Níveis
Z	Refletividade horizontal
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
Zdr	Refletividade diferencial

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1	Inundações na Bacia do rio Mundaú.....	15
2.2	Estimativa de precipitação por radar.....	16
2.2.1	<i>Relação Z-R.....</i>	17
2.2.2	<i>Principais produtos do radar.....</i>	18
2.2.3	<i>Fatores que afetam a precisão das medidas realizadas através do radar</i>	20
2.2.4	<i>Modelagem hidrológica versus radar meteorológico</i>	21
2.3	Sistemas meteorológicos atuantes na costa leste do NEB.....	22
3	MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1	Área de estudo	25
3.2	Seleção dos eventos e dados utilizados.....	27
3.2.1	<i>Pluviométricos e fluviométricos</i>	27
3.2.2	<i>Dados do radar</i>	27
3.3	Caracterização meteorológica dos eventos	29
a)	<i>Análise dos parâmetros oceânicos e atmosféricos em julho de 2015</i>	29
b)	<i>Análise dos parâmetros oceânicos e atmosféricos em maio de 2017</i>	30
3.4	Estatísticas de ocorrência de chuva.....	31
3.5	Estatísticas quantitativas de chuva.....	33
3.6	Modelagem hidrológica	34
4	RESULTADOS	35
4.1	Análise preliminar das estimativas de chuva pelo radar	35
4.2	Estatísticas de ocorrência de chuva.....	37
4.3	Estatísticas quantitativas de chuva.....	38
4.4	Modelagem hidrológica	40
5	DISCUSSÕES	46

5.1	Análise preliminar das estimativas de chuva pelo radar	46
5.2	Estatísticas de ocorrência de chuva.....	46
5.3	Estatísticas quantitativas de chuva.....	46
5.4	Modelagem hidrológica	47
6	CONCLUSÕES.....	50
7	REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

Campos de precipitação derivados de estimativas de radar meteorológico apresentam muitas vantagens em relação aos campos de precipitação derivados de redes convencionais de monitoramento como, por exemplo, a grande cobertura espacial, a alta resolução no espaço-tempo e disponibilidade de informações em tempo real. Tais estimativas podem ser utilizadas como dados de entrada para simulações hidrológicas de eventos extremos, melhorando o entendimento da resposta da bacia, a gestão e a previsão de eventos extremos (COLLIER, 1996; ROSSA, 2013; RICO-RAMIREZ et al., 2015; THORND AHL et al., 2017). No entanto, é reconhecido que a estimativa de precipitação por radar possui erros e incertezas que podem acarretar em previsões hidrológicas de baixa qualidade (JORDAN et al., 2000; FRANZ; HOGUE, 2011; RICO-RAMIREZ et al., 2015).

Fatores importantes que dão origem a erros e incertezas na estimativa de precipitação por radar são relacionados a distúrbios do processo de medição de variáveis do radar (e.g., estabilidade de calibração e atenuação) e deficiências no procedimento de conversão dos valores de refletividade medidos pelo radar para precipitação.

Desde 1948, após a Segunda Guerra Mundial, os radares meteorológicos terrestres realizam estimativas de chuvas baseadas na relação desenvolvida por Marshall e Palmer (1948). De acordo com essa relação universal, há uma forte correlação entre a taxa de refletividade do radar (Z) e a quantidade de chuva (R) que é conhecida pela relação Z - R . Embora haja uma forte correlação entre Z e R , isso não significa que a refletividade de radar é exatamente igual à quantidade de chuva (PRAT e BARROS, 2009; MANDAPAKA et al., 2009). Os coeficientes empíricos da equação Z - R incorporam erros e incertezas associadas às características climatológicas, distribuição das chuvas, das estações pluviométricas (porque a Z - R é calibrada usando dados observados, então é influenciada pela precisão e densidade da rede) (CHUMCHEAN et al., 2006) e duração do tempo de chuva (SUK et al., 2013).

Calheiros e Zawadzki (1986) indicaram a necessidade de se dispor de uma relação Z - R específica para cada local com a finalidade de mitigar erros e incertezas das estimativas de precipitação. Alguns estudos têm avaliado o desempenho da precipitação estimada por radar em modelos chuva-vazão, no entanto, em sua maioria, empregam apenas uma fonte de dados (geralmente o produto CAPPI) e não exploram relações Z - R locais (e.g., FRANZ e HOGUE, 2011; RICO-RAMIREZ et al., 2015; CECINATI et al., 2017; CHEN et al., 2016; THORND AHL et al., 2017).

A aplicação de Z-R locais pode trazer uma melhoria significativa nas taxas de precipitação estimadas, uma vez que as relações Z-R são fortemente dependentes da localização e tipo de chuva (RAMLI e TAHIR, 2011).

De fato, a incerteza quanto à precipitação é um papel complexo na análise da modelagem hidrológica. Ela pode se propagar através do modelo hidrológico, interagindo com outras fontes de incerteza (e.g. valores dos parâmetros, estrutura conceitual do modelo), e contribuir diretamente para a incerteza das estimativas dos valores de vazões, sobretudo quando o modelo é utilizado para realizar previsões em curto prazo de eventos extremos.

Zhu et al., (2014) levantam uma questão importante a ser abordada: qual a implicação na escolha de modelos hidrológicos com diferentes estruturas quando utilizada a precipitação estimada pelo radar como alternativa aos dados de pluviômetros? Nesse sentido, a utilização de dados com alta resolução espacial e temporal em modelos hidrológicos mais sofisticados precisa ser investigada em relação a sua representatividade para eventos de curto-prazo no comportamento hidrológico de uma bacia hidrográfica.

Neste contexto, este trabalho avaliou os erros nas estimativas de eventos extremos de cheia considerando o uso de diferentes formas de estimativas de precipitação por radar (i.e. produtos CAPPI e PPI, empregando diferentes relações Z-R e dupla polarização). Os resultados deste estudo compõem o primeiro passo rumo ao uso de informações do radar para previsão hidrológica na área de estudo, além de analisar quais fontes de dados geram melhores respostas nas estimativas de vazão.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Inundações na Bacia do rio Mundaú

As cheias naturais na bacia hidrográfica do rio Mundaú (BHRM), historicamente, têm causado danos com certa regularidade no Estado de Alagoas. Nos últimos 100 anos, 8 grandes cheias assolaram a região (1914, 1941, 1969, 1988, 1989, 2000, 2010 e 2017).

De acordo com Fragoso et al., (2010), a cheia de 1969 foi a mais letal para a região, com cerca de 1.100 mortes em pouco mais de 4 horas. A cidade de São José da Laje, localizada na bacia do rio Mundaú, foi a mais duramente castigada. Somente nesta cidade cerca de 400 pessoas morreram nestas poucas horas.

Em 1988, a tragédia se repete: 21 municípios alagoanos foram atingidos pelas enchentes de maio causando imensos danos em toda área das bacias dos rios Paraíba e Mundaú. Naquele ano foram registradas 9.000 casas danificadas, das quais 4.000 foram totalmente destruídas. Foram duramente atingidos os serviços essenciais de abastecimento de água, de saúde, de educação, de energia elétrica, além dos danos provocados na infraestrutura viária de um modo geral. Neste evento, o nível máximo de cheia registrado na estação Fazenda Boa Fortuna, no Rio Mundaú, foi de 9,83 m, com vazão máxima registrada de 912 m³/s.

No ano seguinte, em julho de 1989, o fenômeno se repete com maior intensidade, atingindo 17 dos 21 municípios que constituem as bacias dos rios Paraíba e Mundaú. Na ocasião, 14.600 casas foram atingidas, das quais 6.700 totalmente destruídas.

No ano de 2000, outra enchente afeta duramente a região. Desta vez são 36 mortes e 76 mil desabrigados, dezenas de milhares de casas destruídas, 14 pontes destruídas e a suspensão do serviço de transporte ferroviário pela destruição das linhas férreas. Neste evento, o nível máximo de cheia registrado na estação Fazenda Boa Fortuna, no Rio Mundaú, foi de 10,5 m, com vazão máxima estimada em 1092 m³/s.

Ainda segundo os autores, no ano 2010, nos dias 18 e 19 de junho, a região foi novamente devastada pelas cheias dos rios Paraíba e Mundaú. Os relatos iniciais, sobretudo aqueles feitos pelos moradores das cidades afetadas, indicam ser esta a maior cheia histórica nestas bacias. No boletim emitido no dia 23 de junho de 2010, os números de desabrigados e desalojados eram de 26.618 e 47.897 mil pessoas respectivamente. Foram notificadas 26 mortes e 22 desaparecidos, e ainda 7.669 casas danificadas e 9.732 casas destruídas.

Em 2017, segundo a Defesa Civil, a população de Alagoas e Pernambuco foi afetada pelas fortes chuvas, sendo necessário o repasse de R\$ 30,9 milhões através do Ministério da Integração Nacional para ações emergenciais.

2.2 Estimativa de precipitação por radar

A comparação dos dados estimados pelo radar com dados de pluviômetros é importante para entender as diferenças na estratégia de amostragem dos instrumentos e as suas limitações. O radar faz uma varredura em uma série de ângulos de elevação completando uma medição do volume no espaço ao redor do radar a cada 10 minutos. Isto implica que o radar irá retornar uma simples amostra de um campo de precipitação de um mesmo local no intervalo de tempo citado acima, enquanto que o pluviômetro acumula os dados de precipitação continuamente em um único ponto.

Enquanto a diferença entre essas duas amostragens pode não ser significativa no caso de uma precipitação uniforme, em situações convectivas, onde a expectativa de vida média de uma tempestade é da ordem de aproximadamente 20 a 30 minutos, uma varredura a cada 10 minutos impõe uma série de dúvidas sobre a acuracidade dos dados do radar (JORDAN et al., 2000).

Há um retardamento entre a medida efetuada pelo radar e a realizada pelo pluviômetro. Para uma mudança rápida na intensidade da precipitação esse retardamento introduz uma discrepância maior entre as duas medidas. Essa defasagem pode ser ainda maior conforme a distância entre o pluviômetro e o radar (CALHEIROS e ZAWADZKIB, 1986).

As medidas do radar e do pluviômetro se aproximam quando a integração dos dados é feita considerando um período maior de precipitação. Comparações instantâneas mostram grande discrepância devido aos problemas na conversão de refletividade para taxas de precipitação e também devido às diferentes características dos instrumentos. A relação entre a refletividade (Z) e a precipitação (R), quando a precipitação é do tipo constante e uniforme, pode ser bem-sucedida. Quando ocorrem chuvas altamente variáveis no tempo e no espaço, a discrepância devido ao atraso entre as medidas e a suavização nas observações realizadas pelo radar tornam praticamente impossível qualquer melhoria na qualidade da relação Z - R (CALHEIROS e ZAWADZKIB, 1986).

Uma parte significativa da dispersão observada na relação entre o radar e o pluviômetro pode ser atribuída ao fato de que a medida de um simples pluviômetro pode não ser representativa de uma área média de precipitação de aproximadamente $4 \times 4 \text{ km}^2$ (JORDAN et al., 2000). Além disso, as diferenças entre dados de radar e pluviômetros são também dependentes da distância radar-pluviômetro (ANTONIO, 1984).

Segundo (ANTÔNIO, 1998), a integração dos dados de radar sobre áreas mais extensas com um maior intervalo de tempo, normalmente minimiza os efeitos discrepantes dos valores obtidos pelo radar quando comparados às medidas obtidas nos pluviômetros. Nesse trabalho, o

autor utilizou dados de refletividade de imagens tipo CAPPI do radar meteorológico do IPMet/UNESP e pluviógrafos localizados dentro da área de cobertura do radar, além de dois disdrômetros, numa tentativa de ajustar medidas de chuva com o radar em tempo real.

Antônio (1998) corrobora as afirmações de Calheiros e Zawadzki (1986) de que as tentativas de se utilizarem séries curtas de dados de precipitação medidas com pluviômetros e estimadas por radar, têm levado a resultados pouco satisfatórios, quer no estabelecimento de relações Z-R específicas para cada sítio, quer nas relações Z-R de cada período, como foi demonstrado em seu trabalho utilizando oito estações pluviométricas situadas na região central do Estado de São Paulo.

2.2.1 Relação Z-R

O radar mede o fator de refletividade do radar (Z), que pode ser transformado em taxa de precipitação (R), utilizando uma equação geralmente referida como relação Z-R, dada por:

$$Z = aR^b \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

a e b: constantes numéricas;

Z: fator de refletividade do radar (mm^6/m^3);

R: taxa de precipitação (mm/h).

O sistema de radar pode melhorar a estimativa da precipitação usando diferentes relações Z-R calibradas com dados observados. Além disso, a seleção de eventos com diferentes condições sinóticas pode fornecer um ganho nas estimativas de precipitação pelo radar (LIBERTINO et al., 2015).

A distribuição do tamanho de gota de chuva (DTG) varia de local para local, entre os diferentes sistemas meteorológicos e com a sazonalidade. Moraes (2011) recomenda determinar relações Z-R específicas para cada sistema meteorológico que atinge a região de Alagoas.

O CEMADEN gerencia nove radares localizados em: Natal (RN), Petrolina (PE), Salvador (BA), Jaraguari (MS), São Francisco (MG), Maceió (AL), Santa Tereza (ES), Três Marias (MG) e no município de Almenara (MG). Logo, empregam relações Z-R mais gerais, a fim de atender a demanda das diferentes regiões. As relações Z-R utilizadas pelo CEMADEN são apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 – Relações Z-R utilizadas pelo CEMADEN.

Nomenclatura	Relação Z-R	Aplicação
Marshall-Palmer	$Z = 200 R^{1,6}$	Precipitação geral, estratiforme
WSR-88D	$Z = 300 R^{1,4}$	Precipitação convectiva (convecção profunda)
Rosenfeld Tropical	$Z = 250 R^{1,2}$	Precipitação convectiva (sistemas convencionais de convecção)

Para Alagoas, foram desenvolvidas por Sarmiento Tenório *et. al.* (2010), as relações Z-R apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Relações Z-R desenvolvidas para Alagoas.

Relação Z-R	Aplicação
$Z = 167 R^{1,26}$	Precipitação estratiforme
$Z = 65 R^{1,69}$	Precipitação convectiva
$Z = 176,5 R^{1,29}$	Geral

2.2.2 Principais produtos do radar

O radar gera imagens gráficas no formato 2D obtidas a partir de uma determinada varredura. Os radares meteorológicos são capazes de gerar vários produtos, podemos destacar:

➤ Produtos padrão

PPI (Plan Position Indicator); CAPPI (Constant Altitude Plan Position Indicator); DPSRI (Dual Polarization Surface Rainfall Intensity); RHI (Range Height Indicator); MAXCAPPI (Maximum Constant Altitude Plan Position Indicator); MPPI (Multiple Plan Position Indicator); EHT (Echo Height); EB (Echo Base); VAD (Velocity Azimuth Display); VVP (Volume Velocity Processing).

➤ Produtos hidrológicos

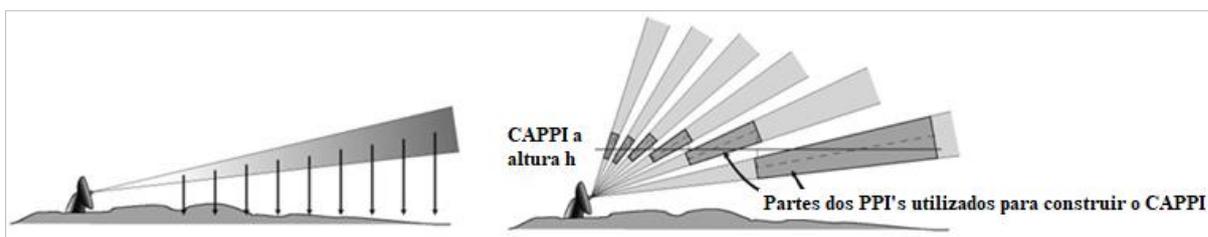
PAC (Precipitation Accumulation); PRT (Point Rainfall Total); RGRT (Raingauge – Radar Total); RIH (Rainfall Intensity Histogram); RSA (River Subcatchment Accumulation); SRI (Surface Rainfall Intensity); VIL (Vertical Integrated Liquid).

No presente trabalho, destaca-se o uso dos produtos CAPPI e PPI, além do emprego da DPSRI. O produto PPI (*Indicador de Posição do Plano*) fornece a projeção num plano horizontal dos dados de refletividade, taxa de precipitação, velocidade radial média ou largura espectral, obtido através de uma varredura em azimute em coordenadas polares, para um ângulo de elevação determinado. Já o produto CAPPI (*Indicador de posição do plano de altitude constante*) fornece a projeção em um plano horizontal constante pré-definido, dos dados de

refletividade, taxa de precipitação, velocidade radial média ou largura espectral, obtidos através de uma varredura volumétrica.

Para a composição de um CAPPI (Figura 1), programa-se a antena do radar para dar uma volta completa (360°) e mudar sua elevação em relação ao horizonte. Com isso consegue-se "varrer" completamente a atmosfera, do solo até o topo das nuvens. De cada elevação é extraído um anel de informações cuja altura média corresponde a um valor pré-estabelecido.

Figura 1 – Composição de um CAPPI.



Fonte: Adaptado de CRAHI, 2014.

Os radares convencionais (polarização única) utilizam apenas o fator refletividade (Z) para estimativas de precipitação, enquanto que a dupla polarização (DPSRI - Dual Polarization Surface Rainfall Intensity) fazem uso também da refletividade diferencial (Z_{dr}) e da diferencial de fase específica (K_{dp}).

- Refletividade diferencial (Z_{dr}) – é a razão dos retornos de potência vertical e horizontal. É um bom indicador do formato da gota, e o formato da gota é uma boa estimativa do tamanho médio da gota.
- Diferencial de fase específica (K_{dp}) – é uma comparação da diferença de fase retornada entre os pulsos horizontal e vertical. É um bom estimador da razão de chuva e não é afetado pela atenuação. Pode ser usada para localizar áreas de forte precipitação/atenuação.

A utilização de parâmetros adicionais à refletividade promove uma melhoria significativa na qualidade das informações coletadas em um radar. É possível a distinção entre ecos de precipitação e ecos provenientes de outros alvos (terreno, insetos, pássaros, neve, granizo, etc.), minimizando, por exemplo, as incertezas do espectro de gotas nas estimativas de precipitação (RYZHKOV et al., 2005).

A metodologia da dupla polarização consiste em aplicar além da Z – refletividade horizontal [dBZ], as variáveis polarimétricas Z_{dr} – refletividade diferencial [dB] e K_{dp} – diferencial do deslocamento de fase [$^\circ/\text{km}$], conforme os limiares de taxa de precipitação

(Equações 2, 3, 4, 5 e 6) para a obtenção da precipitação instantânea segundo a proposta por Ryzhkov et al., (2005), metodologia esta que está embutida no *Software Rainbow*[®].

A cada varredura (10 minutos) é feita essa estimativa e os resultados são acumulados em períodos de 24-h.

$$R = \frac{R(Z)}{0,4 + 5,0|Z_{dr} - 1|^{1,3}} \quad \text{Equação 2}$$

Para: $R(Z) < 6 \text{ mm/h}$

$$R = \frac{R(K_{dp})}{0,4 + 3,5|Z_{dr} - 1|^{1,7}} \quad \text{Equação 3}$$

Para: $6 < R(Z) < 50 \text{ mm/h}$

$$R = R(K_{dp}) \quad \text{Equação 4}$$

Para: $R(Z) > 50 \text{ mm/h}$

Onde:

$$R(Z) = \frac{1}{a^{1/b}} Z^{1/b} \Leftrightarrow Z = aR^b \quad \text{Equação 5}$$

$R(Z)$ é a relação Z-R. Em que a e b são constantes, Z corresponde a refletividade e R corresponde a precipitação.

$$R(K_{dp}) = 44|K_{dp}|^{0,822} \quad \text{Equação 6}$$

Para $KDP > 0$

Estimativas de precipitação baseadas em variáveis polarimétricas tem sido foco de diversos estudos nas últimas 3 décadas. Diferentes relações para taxas de precipitação (R) foram sugeridas por diversos autores, as mais comuns utilizam combinações do tipo $R(Z, Z_{dr})$, $R(K_{dp})$ ou $R(K_{dp}, Z_{dr})$ e têm demonstrado vantagens quando comparadas a relações baseadas somente em refletividade Z (CIFELLI et al., 2011).

2.2.3 Fatores que afetam a precisão das medidas realizadas através do radar

Por melhor que seja a relação determinada com base em um posto pluviométrico, à medida que se caminha, no sentido do afastamento deste posto, a precisão da relação Z-R

diminui. Baseando-se neste fato, estudos foram realizados Huff (1967) no intuito de quantificar tal decréscimo da precisão Z-R com a distância ao posto.

Além disso, à medida que o local de interesse se afasta do radar, piora a qualidade das informações registradas para avaliação da chuva, através do fator de refletividade. Atualmente já se tem empregado coeficientes de correção nas relações Z-R, a fim de minimizar estas distorções ocasionadas pela alteração das informações com a distância alvo-radar.

Pode-se atribuir as incertezas na estimativa da precipitação por radar a três principais fontes:

- a) Amostra da Distribuição do Tamanho de Gotas (DTG);
- b) Área de integração;
- c) Tempo de integração;

No que se refere ao item a), a amostra da DTG afeta os parâmetros empíricos a e b da relação Z-R, pois são geralmente derivados na escala do disdrômetro, não na escala do radar, o que pode levar a erros (VERRIER et al., 2013).

Tratando-se da área de integração, Calheiros e Zawadzki (1986) discutem a necessidade de se dispor de uma equação Z-R específica local ou para cada intervalo de distância, o que permite o uso do radar para o estabelecimento do campo espacial da precipitação. Libertino et al., (2015), discutem que variabilidade espaço-tempo afetam os coeficientes a e b e, por sua vez, a precisão geral do radar.

A quantificação das chuvas é afetada por muitas limitações práticas, especialmente em intervalos de tempo mais longos (CALHEIROS e ZAWADZKIB, 1986).

2.2.4 Modelagem hidrológica versus radar meteorológico

Embora existam várias fontes de incertezas que afetam a precisão da resposta hidrológica em bacias hidrográficas, a precipitação é sem dúvidas umas das principais fontes de incerteza (KRZYSZTOFOWICZ, 1999; KRZYSZTOFOWICZ, 2001; HOSSAIN et al., 2004; KAVETSKI et al., 2006a; KAVETSKI et al., 2006b; NIKOLOPOULOS et al., 2010).

Javier et al. (2007), estudaram a utilidade de modelos hidrológicos distribuídos em combinação com estimativas de precipitação provindas do radar, tendo como área de estudo uma bacia localizada no Condado de Baltimore, Maryland. Foram analisados 10 eventos e para os três maiores picos de cheia, as previsões do modelo hidrológico não capturam a atenuação dos picos.

Cabral et al. (2016), empregaram a relação de Marshall-Palmer para estimativa da chuva por radar e fizeram uso do modelo hidrológico SCS-CN na bacia do rio São Miguel situada

entre a Zona da Mata e o Agreste Alagoano. Os volumes estimados pelo modelo chuva-vazão apresentaram erros para todos os eventos, com erros menores para a simulação usando precipitações observadas (9,49%), e erros maiores para estimativas de precipitações por radar (40,87%). Os autores sugerem que esses erros podem estar relacionados à distribuição espacial da precipitação observada e/ou à subestimação da precipitação por radar. Ainda, seguindo o que foi encontrado por (BRANDES, 1975) e (BARNES, 1964), fez-se necessário o emprego de um fator de correção de 60% na chuva estimada pelo radar.

Miguel (2018), fez uso de dados de radar meteorológico em modelo hidrológico SCS-CN para estimativa de escoamento superficial na bacia hidrográfica do rio Jacaré Guaçu, localizada no centro-leste do Estado de São Paulo. A autora explorou 3 relações Z-R: Calheiros, Jones e Marshall-Palmer. Os melhores resultados da validação foram obtidos pela relação Marshall-Palmer que apresentou o maior r^2 , mas sempre subestimando o valor precipitado.

O trabalho aqui apresentado é continuidade da pesquisa desenvolvida na dissertação de mestrado de Queiroz (2018), que explorou dados do radar meteorológico empregando a relação Z-R de Marshall-Palmer na bacia do rio Mundaú, utilizando o modelo distribuído MGB-IPH. O modelo hidrológico foi calibrado e validado para quatro eventos extremos de chuva (observada e estimada por radar), utilizando dados de estações horárias, obtendo uma boa correspondência entre os dados estimados e observados de vazão. O coeficiente de NS obtido utilizando a chuva observada foi de 0,92 na calibração manual e 0,94 na calibração automática, com melhor desempenho para o modelo de Muskingum-Cunge em relação ao Inercial como método de propagação de vazão. A precipitação do radar obteve melhores resultados nas estimativas de vazão quando utilizado um fator de correção constante de 1,9 em comparação ao fator de correção variando com a distância. Os resultados obtidos mostram que o radar meteorológico vem como alternativa para estimativa da precipitação como forma de superar a limitação da rede pluviométrica ou para melhorar a informação da rede existente, propiciando subsídios aos gestores no planejamento dos recursos hídricos.

2.3 Sistemas meteorológicos atuantes na costa leste do NEB

Diversos sistemas sinóticos provocam, direta ou indiretamente, precipitações na costa leste do Nordeste Brasileiro (NEB). Dentre eles, podem-se citar os Sistemas Frontais (SF) que são caracterizados por uma região de limite entre duas massas de ar que possuem características diferentes, como temperatura, umidade e instabilidade (GEMIACKI, 2005; CRUZ, 2008). A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) é um cinturão composto por aglomerados de nuvens convectivas, oriundas da confluência entre os ventos alísios de nordeste e sudeste na região equatorial. Em alguns casos, a ZCIT consegue influenciar o tempo em Alagoas, muitas vezes

indiretamente, isto é, via “pulsos” de nebulosidade que se desprendem de sua área de maior atuação e se dirigem para sul, atingindo o Estado (COELHO-ZANOTTI, et al., 2004).

Também devem ser mencionados os Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), circulação ciclônica situada nos altos níveis da troposfera (MISHRA et al., 2007). Além dos VCANs, podem ser observados Vórtices Ciclônicos de Médios Níveis (VCMN) no NEB, circulação ciclônica dos ventos observada somente em médios níveis da atmosfera. A Alta ou Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) tem um papel importante no regime de chuvas no leste do NEB, pois é observado que no período chuvoso dessa região, sua circulação advecta umidade do oceano em direção ao continente sul-americano, ajudando no processo de convergência do fluxo de umidade na costa nordestina, o que reforça a instabilidade na região (BASTOS e FERREIRA, 2000).

Outro sistema importante são as Ondas ou Distúrbios Ondulatórios de Leste (OL), perturbações associadas a cavados (prolongamentos de uma área de baixa pressão na atmosfera), mais bem configurados em médios níveis da troposfera (700, 500 hPa), e à temperatura elevada na superfície do mar, onde sua nebulosidade é caracterizada por nuvens convectivas que se deslocam de leste para oeste nos oceanos, atingindo áreas continentais da costa leste do NEB (COUTINHO e FISCH, 2007).

Sistemas meteorológicos de escala menor que a dos anteriormente citados (Sistemas de Mesoescala) ainda devem ser mencionados como, por exemplo, os Complexos Convectivos de Mesoescala (CCM), que são aglomerados de nuvens de forte desenvolvimento vertical, produtoras de precipitações intensas (ALVES et al., 2001). Brito et al. (2011), estudaram um caso de CCM que atingiu o leste de Alagoas, provocando precipitações intensas em Maceió, capital do Estado.

De grande importância no regime de chuvas em Alagoas são as Perturbações Ondulatórias no Campo dos Ventos Alísios (MOLION et al., 2004). Esses distúrbios são formados pela convergência dos ventos que acompanham os Sistemas Frontais com os ventos alísios. Dão origem à grande nebulosidade ao se aproximarem de áreas costeiras, devido à convergência do fluxo de umidade e contraste de temperatura entre oceano e continente. Também sistemas mais localizados, como as brisas de terra e mar e a convecção local, não podem ser descartados como mecanismos que contribuem nos totais pluviométricos observados no Estado.

Quanto aos fenômenos adversos gerados pela Corrente de Jato do Nordeste Brasileiro (CJNEB) em Alagoas, Brito et al. (2011) destacaram a formação de névoa úmida e seca, chuva leve intermitente, nevoeiro e pancadas de chuva. As distribuições espaciais típicas da CJNEB

observadas foram: de norte para o sul, nordeste para sudoeste, sudeste para nordeste, noroeste para sudeste e zonal.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho fez uso dos dados do radar meteorológico, derivados dos produtos CAPPI e PPI, empregando três relações Z-R locais desenvolvidas para Alagoas, além da relação de Marshall-Palmer. Como forma de investigação acerca da qualidade das estimativas de chuva por meio do radar meteorológico, foram determinadas as estatísticas de ocorrência e quantificação de chuva. A chuva estimada pelo radar foi usada como dado de entrada no modelo chuva-vazão MGB-IPH para avaliar a qualidade das estimativas de vazões.

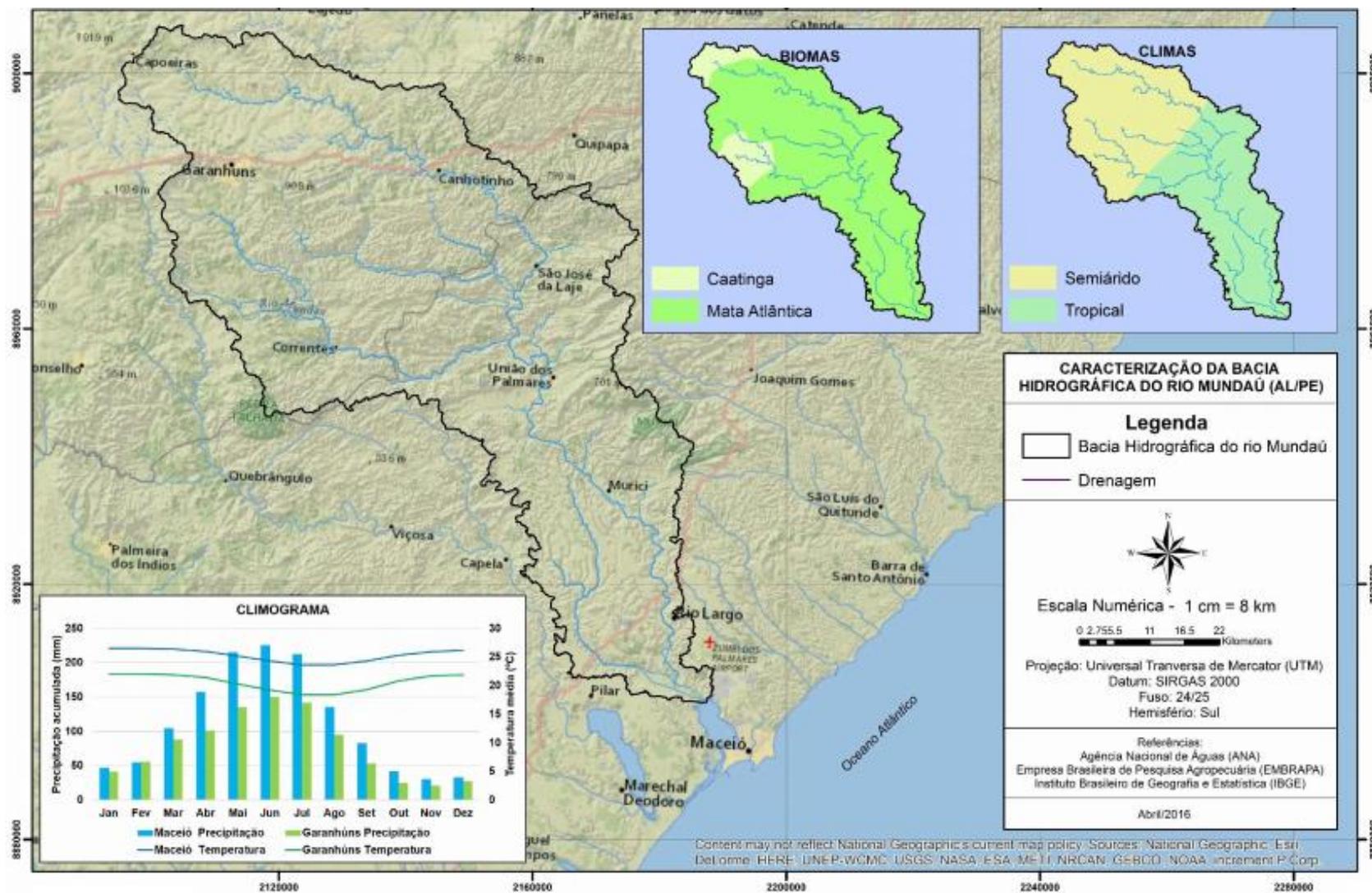
3.1 Área de estudo

O rio Mundaú nasce no agreste pernambucano no município de Garanhuns e deságua em Alagoas na laguna Mundaú, Complexo Estuarino Lagunar Mundaú-Manguaba (CELMM). O rio principal possui uma extensão de aproximadamente 140 km, com uma declividade média de 3,75 m/km e tempo de concentração médio de 1,57 dias (FRAGOSO et al., 2010). A Bacia Hidrográfica do Rio Mundaú (BHRM) com uma área de aproximadamente 4.105 km² abrange 36 municípios, 17 pernambucanos (53% de área) e 19 municípios alagoanos (47% de área). A importância para os estados deve-se principalmente: a) ao abastecimento de diversos reservatórios e barragens localizadas na cabeceira (região semiárida); b) ao abastecimento de água para irrigação de diversos cultivos (agricultura); c) preservação do CELMM, um dos complexos lagunares mais produtivos do Brasil (SOUZA et al., 2004).

A geologia da BHRM é determinada no alto e no médio pelo Maciço Pernambuco-Alagoas, baseado em rochas cristalinas (i.e. de formação ígnea ou metamórfica), com menos capacidade de infiltração, e no baixo curso está situada a Bacia Sedimentar Sergipe-Alagoas, ocupando uma pequena parte da BHRM, tendo maior capacidade de infiltração (MONTE, 2013).

Costa (2014), destaca que a parte alta da BHRM está inserida no bioma Caatinga, tendo aspecto climático semiárido, estando inclusive no Polígono das Secas, e o bioma Mata Atlântica na parte baixa estende-se até a foz com clima Tropical (Figura 2). A BHRM é composta por áreas influenciadas por sistemas atmosféricos combinados (desde mecanismos de média escala a sistemas sinóticos) que proporcionam eventos de secas ou enchentes. Na Figura 2 é possível identificar dois períodos distintos no regime pluviométrico. O período seco ocorre entre setembro e fevereiro e o úmido de março a agosto (concentração de 70% do regime pluviométrico anual), sendo que 50% do total precipitado anual ocorre entre maio e julho (COSTA, 2014; COSTA et al., 2016).

Figura 2 - Localização e caracterização da Bacia Hidrográfica do rio Mundaú (BHRM).



Fonte: Alves, 2016.

3.2 Seleção dos eventos e dados utilizados

O radar meteorológico utilizado neste trabalho, passou a operar a partir de abril de 2014. Baseado nos episódios de cheia na BHRM e na série de dados do radar, Queiroz (2018) solicitou ao CEMADEN dados do produto CAPPI empregando a Z-R de Marshall-Palmer para 4 eventos (Quadro 3).

Quadro 3 – Eventos hidrológicos usados por Queiroz (2018).

Evento	Início	Fim
1	14/05/2014	17/05/2014
2	06/10/2014	10/10/2014
3	30/06/2015	08/07/2015
4	18/05/2017	30/05/2017

Para a realização do presente estudo, foi requerido ao CEMADEN dados referentes aos mesmos eventos usados por Queiroz (2018), acrescentando o emprego das relações Z-R desenvolvidas para Alagoas, fazendo uso dos produtos CAPPI e PPI, além do emprego da dupla polarização. No entanto, o CEMADEN forneceu essas combinações apenas para dois eventos (Quadro 4), e estes foram usados neste trabalho.

Quadro 4 – Eventos hidrológicos de interesse.

Evento	Início	Fim
1	30/06/2015	08/07/2015
2	18/05/2017	30/05/2017

3.2.1 *Pluviométricos e fluviométricos*

Para esse estudo foram utilizados dados de chuva e de vazão em escala horária e diária, de estações automáticas e convencionais, disponibilizados pela Agência Nacional de Águas (ANA) e o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN).

3.2.2 *Dados do radar*

Foram utilizados os dados do radar meteorológico gerenciado pelo CEMADEN, instalado em Maceió/AL, localizado em 35.77°W e 9.55°S (dentro do Campus A. C. Simões da UFAL), banda S, doppler e de dupla polarização. Os pontos da grade do radar têm resolução espacial de 0,5 m x 0,5 m, cobrindo a área da BHRM, onde cada ponto da grade corresponde a uma estação pluviométrica virtual.

Neste trabalho foram analisadas 6 (seis) fontes de dados provindas do radar meteorológico, denominados neste trabalho como modelos Z-R. Os dados são dos produtos CAPPI e PPI (ver Quadro 5), utilizando as relações Z-R desenvolvidas para Alagoas, segundo

Sarmento Tenório et al. (2010), e a equação de Marshall-Palmer (1948) desenvolvida para os EUA.

Quadro 5 – Descrição dos dados do radar.

Produto	Equação Z-R	Variáveis	Nomenclatura (Modelo)
CAPPI	Geral de Alagoas	Refletividade horizontal - Zh (dBZ)	P1G
	Geral de Alagoas DPSRI (Dual Polarization Surface Rainfall Intensity)	Refletividade horizontal - Zh (dBZ)	P1R
		Refletividade diferencial - Zdr (dB)	
		Diferencial de deslocamento de fase - Kdp (°/km)	
	Convectiva e Estratiforme de Alagoas	Refletividade horizontal - Zh (dBZ)	P1T
Marshall-Palmer	Refletividade horizontal - Zh (dBZ)	P1K	
PPI	Geral de Alagoas	Refletividade horizontal - Zh (dBZ)	PGE
	Marshall-Palmer	Refletividade horizontal - Zh (dBZ)	PMP

Optou-se em investigar o desempenho no modelo chuva-vazão fazendo uso dos dados CAPPI e PPI porque cada produto apresenta ganhos e perdas com relação às estimativas de vazão. O PPI é o produto mais próximo de como o radar coleta os dados, isto é, num plano inclinado formando um ângulo com o horizonte, tendo uma maior aproximação com os valores dos pluviômetros, uma vez que é uma leitura mais próxima do solo. No entanto, no produto CAPPI existe um importante efeito de interpolação, principalmente em regiões mais afastadas do radar, que preenche algumas falhas que são geralmente encontradas nos produtos PPI.

No software *Rainbow*[®] usado pelo CEMADEN para operação do radar, foi possível empregar duas equações da relação Z-R: uma para nuvens com formação estratiforme e outra para convectiva. O próprio software *Rainbow*[®] faz uma análise e classificação dos tipos de formação de nuvem. Para a equação geral, a opção de classificação é desligada, utilizando apenas uma equação Z-R.

Além dos dados empregando apenas as diferentes relações Z-R, que utilizam somente a refletividade horizontal (Zh), também foi empregado uma relação de dupla polarização: o DPSRI (Dual Polarization Surface Rainfall Intensity).

Foi utilizado o algoritmo do *Rainbow*[®] para calcular precipitação à superfície (DPSRI) que utiliza como entrada um arquivo de topografia de 250 m (SRTM) e utiliza como referência uma camada entre 0,5 e 5 km de altitude. Desta forma, os obstáculos são identificados e seus efeitos na estimativa de precipitação são "corrigidos". No algoritmo ainda é feito uma classificação de ecos meteo e não-meteo. Esta classificação tem a função de tirar ruídos espúrios ou ecos de céu claro. Além disso, esta classificação não faz uso somente da relação Z-

R que utiliza apenas a refletividade horizontal (Zh), ela emprega também as variáveis polarimétricas Zdr e Kdp.

Em resumo, para o presente trabalho foram avaliadas seis diferentes estimativas de precipitação pelo radar, conforme apresentado anteriormente no Quadro 5.

Os arquivos que foram fornecidos pelo CEMADEN apresentavam a extensão .ctl e .bin, um par de arquivos para cada leitura do radar (a cada 10 min ou acumulado de 1 hora). Uma rotina na linguagem *Python*[®] foi desenvolvida para avaliar a qualidade das estimativas de precipitação (usando estatísticas de ocorrência e quantificação) em pontos da grade que possuem estações automáticas de monitoramento de chuva.

Para a etapa da simulação hidrológica foi necessário converter os arquivos binários para a extensão .sam, usando uma rotina desenvolvida em linguagem de programação *Fortran*[®]. Os arquivos .sam contendo as estimativas de precipitação foram então convertidos em arquivos de extensão .txt através de rotina desenvolvida em linguagem *Python*[®]. Cada arquivo .txt representava uma “estação virtual” no centroide de cada célula do domínio computacional, resultando em 53.125 estações virtuais.

Ainda, foi desenvolvida uma rotina em *Matlab*[®] para realizar uma análise preliminar de consistência dos dados do radar para o produto PPI. Esta rotina tem o objetivo de aplicar um filtro, realizando uma média simples que consiste na troca do valor do pixel central de uma janela de processamento pela média aritmética dos valores dos pixels que pertencem a esta janela, seguindo a metodologia proposta por (SANT’ ANNA, 1995).

3.3 Caracterização meteorológica dos eventos

Queiroz (2018) analisou 4 eventos, identificando um comportamento anômalo para um deles (ocorrido em outubro de 2014), o autor sugeriu que o comportamento poderia estar associado ao tipo de fenômeno atmosférico que originou o episódio de chuvas intensas.

Através da consulta aos boletins do clima (síntese climática), disponibilizados pela APAC (Agência Pernambucana de Águas e Clima), das imagens do satélite GOES13 e das imagens de radar da APAC, foram identificados os sistemas meteorológicos atuantes nos eventos analisados neste estudo.

a) Análise dos parâmetros oceânicos e atmosféricos em julho de 2015

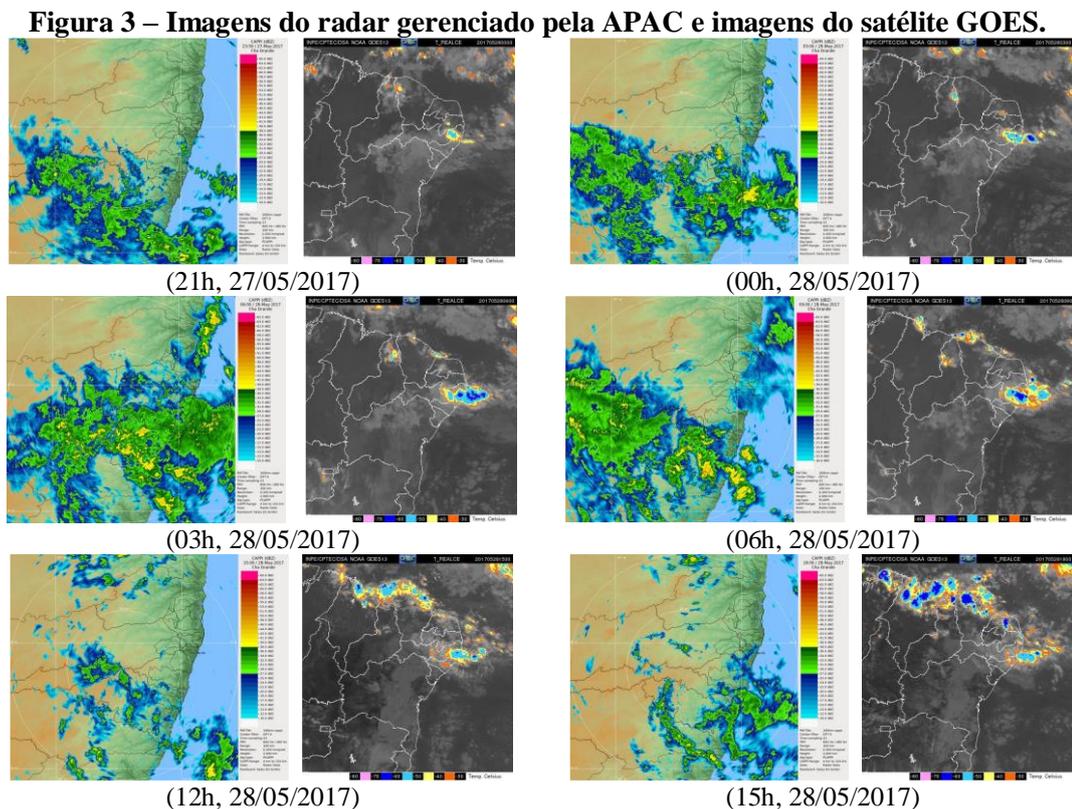
No mês de julho de 2015, foram observadas anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM). No Oceano Atlântico Tropical, observou-se que a área de aquecimento próximo à costa do Nordeste do Brasil (NEB), favorecendo a ocorrência de precipitação na costa Leste do NEB.

Segundo o boletim, existia a formação de um Cavado (prolongamentos de uma área de baixa pressão na atmosfera) na Costa do Nordeste. Essa configuração em baixos níveis favoreceu também a ocorrência de precipitação no mês de julho na costa Leste do NEB. Observou-se em julho o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS) com ventos alísios mais intensos do que o normal.

b) *Análise dos parâmetros oceânicos e atmosféricos em maio de 2017*

De acordo com o Boletim do Clima publicado pela APAC (2017), o evento meteorológico foi iniciado pela formação de uma confluência e intensificação de ventos úmidos nos baixos níveis da atmosfera, desde o oceano até a costa de PE e AL, aumentando a instabilidade e o transporte de umidade do oceano para o continente, entre a Zona da Mata e Agreste. Associado a essa confluência surgiu nas camadas mais acima um distúrbio ondulatório de leste (OL), que aumentou a instabilidade em várias camadas da atmosfera, proporcionando aumento do movimento ascendente e levando umidade da superfície para as camadas mais altas.

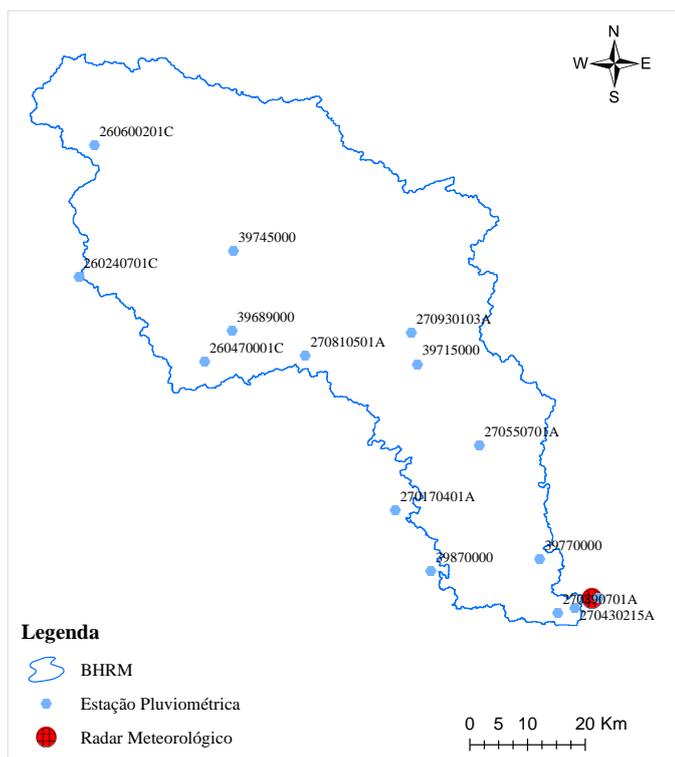
As chuvas mais intensas iniciaram no Agreste, com um aglomerado de nuvens cobrindo grande parte do Agreste pernambucano, na noite do dia 27/05. Nessa mesma noite, as chuvas se expandiram para a Mata Sul e Região Metropolitana, e permaneceram contínuas até o início da tarde do dia 28/05/2017, como visto na sequência de imagens do satélite meteorológico GOES e do meteorológico da APAC (Figura 3).



3.4 Estatísticas de ocorrência de chuva

Foram selecionadas 15 (quinze) estações pluviométricas horárias, inseridas na área de estudo e comum aos dois eventos estudados neste trabalho, conforme localização apresentada na Figura 4.

Figura 4 – Localização das estações pluviométricas.



De posse da localização do pluviômetro, foram empregadas duas metodologias: (a) comparação da precipitação registrada no ponto do radar mais próximo à estação pluviométrica; (b) comparação da precipitação registrada na estação com a mediana dos pontos do radar (malha: 3x3).

Os valores das estatísticas de ocorrência não variam de acordo com a relação Z-R porque o radar mede a refletividade (em dBZ), logo, somente os valores precipitados são alterados de acordo com a equação empregada.

As estatísticas de ocorrência de chuva estão associadas à ocorrência ou não de um evento de chuva, e para isso foi estabelecido um limiar para registros de estimativa de chuva pelo radar iguais ou superiores a um valor mínimo. Considerando a precisão das estimativas do radar foi adotado o limiar de 0,01 mm/h.

Todas as estatísticas referentes nesta seção são baseadas em um Quadro de contingência (ver Quadro 6), a qual contém a frequência dos possíveis eventos para as quatro combinações

de concordância entre os dados estimados por radar e observações de superfície (pluviômetros). Os possíveis eventos foram classificados de acordo com as possíveis combinações para um determinado limiar. Essas combinações encontram-se descritas abaixo:

- **correto positivo (a):** quando o radar e o pluviômetro registram a ocorrência de chuva na bacia igual ou maior do que o limiar determinado;
- **falso alarme (b):** quando o radar registra a ocorrência de chuva na bacia igual ou maior do que o limiar determinado, em discordância com o pluviômetro;
- **falha (c):** quando o radar não registra a ocorrência de chuva na bacia igual ou maior do que o limiar determinado, em discordância com o pluviômetro;
- **correto negativo (d):** quando o radar e o pluviômetro não registram a ocorrência de chuva na bacia igual ou maior do que o limiar determinado.

Quadro 6 - Quadro de contingência utilizada para o cálculo das estatísticas de ocorrência.

Observações da superfície				
Estimativas por radar	-	Sim	Não	Total
	Sim	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>a + b</i>
	Não	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>c + d</i>
Total		<i>a + c</i>	<i>b + d</i>	<i>n = a + b + c + d</i>

Foram selecionadas como métricas de desempenho: a probabilidade de detecção (POD), a razão de falso alarme (FAR) e a razão de acurácia (AR).

A taxa de acerto ou probabilidade de detecção (POD) representa a fração de dados observados que foram corretamente identificados pela estimativa de chuva por radar, sendo representado pela relação apresentada na Equação 7.

$$POD = \frac{a}{a + c} \quad \text{Equação 7}$$

Com isso, o valor de POD varia entre 0 e 1, e para uma perfeita detecção o valor de POD deve ser igual a 1.

A razão de falso alarme (FAR) representa a fração de dados observados sem chuva que não foram corretamente identificados pela estimativa de chuva por radar, ou seja, o radar detecta chuva, porém o dado observado em superfície não. Sendo representado pela relação apresentada na Equação 8.

$$FAR = \frac{b}{a + b} \quad \text{Equação 8}$$

Com isso, o valor de FAR varia entre 0 e 1, obtendo-se valor igual à 0 para uma perfeita estimativa.

A fração correta ou razão de acurácia (AR) mede a fração de eventos estimados corretamente, independentemente se foram corretos positivos (a) ou negativos (d), com relação ao total de eventos (n), sendo representado pela relação apresentada na Equação 9.

$$AR = \frac{a + d}{n} \quad \text{Equação 9}$$

Com isso, a razão varia entre 0 e 1, com perfeita detecção igual a 1.

3.5 Estatísticas quantitativas de chuva

As estatísticas quantitativas de chuva estão associadas às diferenças nos valores de precipitados estimados pelo radar e observados pelos pluviômetros.

O MGB-IPH gera o arquivo chuva.bin que fornece a chuva interpolada para cada mini-bacia (Figura 5), esses arquivos são obtidos para os dados observados e do radar, o que possibilitou a realização das estatísticas quantitativas de chuva.

Figura 5 – Distribuição das mini-bacias e estações pluviométricas usadas na interpolação.



Para análise da estimativa de chuva, no que se refere aos volumes precipitados, foram analisados: erro médio (BIAS), A raiz do erro quadrático médio (RMSE), a diferença de volume e o coeficiente de correlação (r).

O erro médio ou viés aditivo (BIAS) representa o erro médio das taxas de chuva identificadas por radar com relação ao dado de superfície (pluviômetro). Sendo representado pela relação da Equação 10.

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \quad \text{Equação 10}$$

Onde: S_i e O_i representam os i -ésimos pares de estimativa de precipitação e observação por pluviômetro, respectivamente.

Essa medida varia de $-\infty$ a $+\infty$, sendo que para uma perfeita estimativa obtém-se valor igual a 0.

A raiz do erro quadrático médio (RMSE), é comumente usada para expressar a acurácia dos resultados numéricos com a vantagem de que RMSE apresenta valores do erro nas mesmas dimensões da variável analisada. O RMSE é definido pela Equação 11.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2}{N}} \quad \text{Equação 11}$$

A diferença de volume é medida através da subtração entre o volume total observado e aquele que é registrado pelo radar meteorológico, sendo representado em porcentagem.

O coeficiente de correlação (r), representa a associação linear entre as estimativas de chuva por radar e pluviômetros. O alcance varia de -1 a 1, com perfeita associação igual a unidade. O coeficiente de correlação é definido pela Equação 12.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - \bar{S})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - \bar{O})^2}} \quad \text{Equação 12}$$

3.6 Modelagem hidrológica

Foi utilizada a versão 2017 do Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB), a qual está descrita em Pontes et al., (2015). O MGB foi desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) por Collischonn (2001) e aprimorado por Collischonn (2012), e consiste em um modelo hidrológico distribuído de grande escala (bacia $> 10.000 \text{ km}^2$), mas que também já

foi amplamente aplicado satisfatoriamente em bacias de médio porte, entre 2.000 e 10.000 km² (CHAVES, 2015).

O presente trabalho partiu da calibração realizada por Queiroz (2018) na BHRM, onde os resultados mostraram que o modelo chuva-vazão teve um ganho de desempenho nas estimativas de vazões utilizando os dados de chuva horários quando comparados as entradas diárias, as quais foram objeto de aplicação em estudos anteriores (e.g. MONTE, 2013; CHAVES, 2015; ALVES, 2016). Queiroz (2018), fez uso do modelo de Muskingum-Cunge como método de propagação, utilizando a chuva observada horária, onde foi obtido uma boa correspondência entre as estimativas de vazão e os dados observados (i.e. coeficiente de NS de 0,92 na calibração manual e 0,94 na calibração automática). A precipitação do radar, empregando a relação Z-R de Marshall-Palmer no produto CAPPI, obteve melhores resultados nas estimativas de vazão quando utilizado um fator de correção constante de 1,9 para toda a bacia.

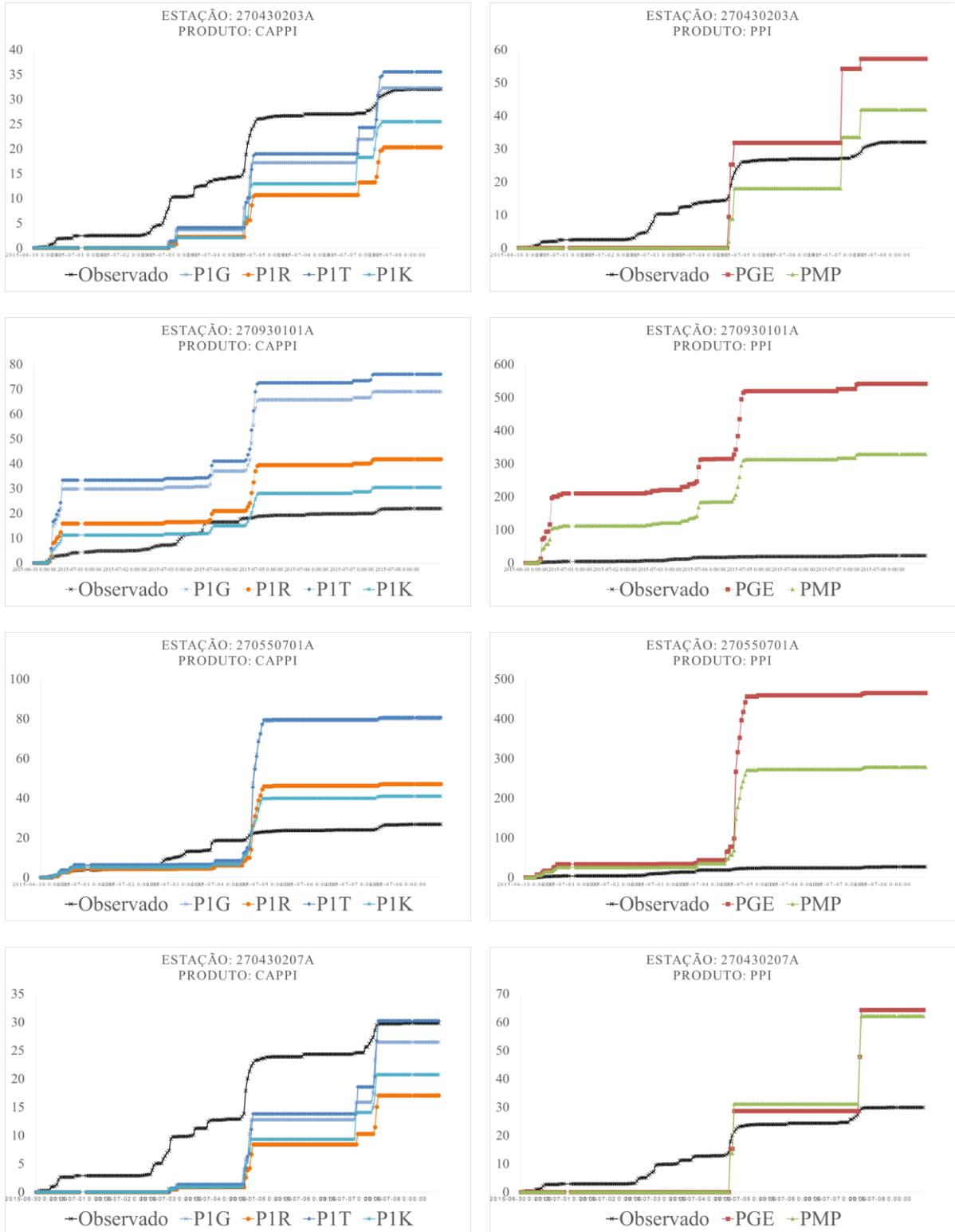
Ao analisar estatisticamente a qualidade das estimativas de chuva do radar, foi detectado que algumas estações pluviométricas utilizadas na calibração realizada por Queiroz (2018) apresentavam inconsistências nos valores medidos. Diante disso, foi realizada uma nova calibração automática fazendo uso das estações pluviométricas com dados consistentes. Utilizando a chuva observada foi obtido coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0,98 na calibração nova automática.

4 RESULTADOS

4.1 Análise preliminar das estimativas de chuva pelo radar

De posse dos modelos Z-R, foi realizada uma análise prévia do desempenho dos mesmos com relação aos dados observados de chuva. Foram selecionadas as quinze estações utilizadas na metodologia de ocorrência de chuva, a Figura 6 apresentada o resultado de quatro dessas estações pluviométricas a fim de ilustrar a diferença entre os totais precipitados dos produtos CAPPI e PPI.

Figura 6 – Comparação entre as estimativas de chuva acumulada pelos produtos CAPPI e PPI e precipitação observada acumulada (mm).



Conforme pode ser observado, os dois modelos do produto PPI apresentam grande discrepância em relação aos dados observados e aos modelos CAPPI.

4.2 Estatísticas de ocorrência de chuva

As estatísticas foram realizadas para o produto CAPPI, seguindo os resultados encontrados na seção anterior (4.1).

Os resultados das estatísticas, probabilidade de detecção, razão de falso alarme e razão de acurácia são apresentados nas Figura 7, Figura 8 e Figura 9, respectivamente. As estações pluviométricas foram posicionadas nos gráficos de acordo com sua distância do radar, sendo a primeira estação (da esquerda para a direita) a mais próxima.

Figura 7 – Probabilidade de detecção (POD) da chuva em diferentes estações pluviométricas.

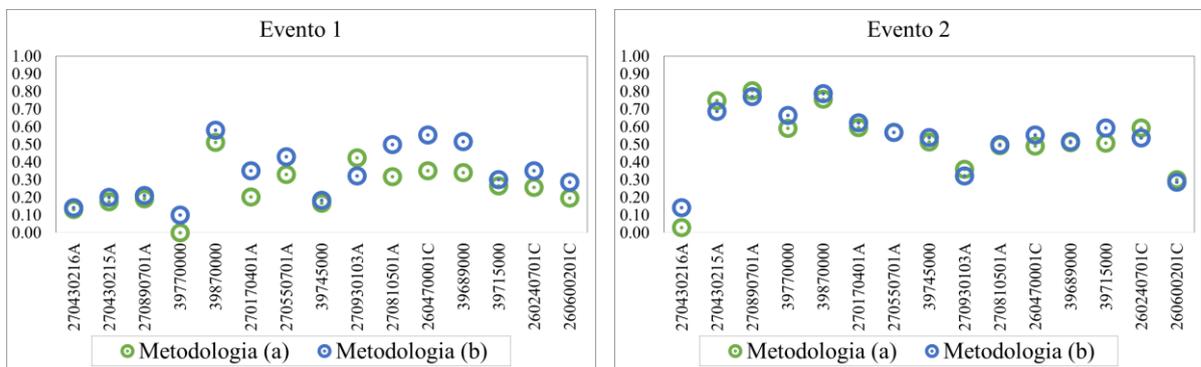


Figura 8 – Razão de falso alarme (FAR) da chuva em diferentes estações pluviométricas.

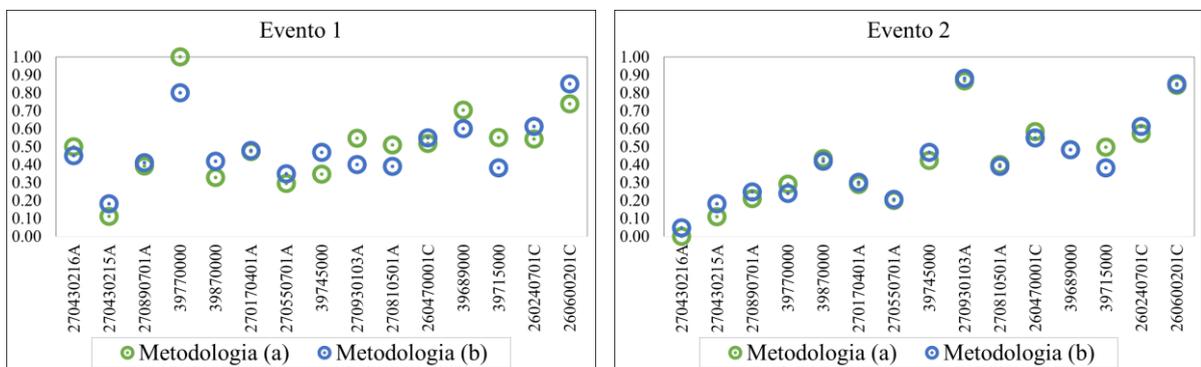
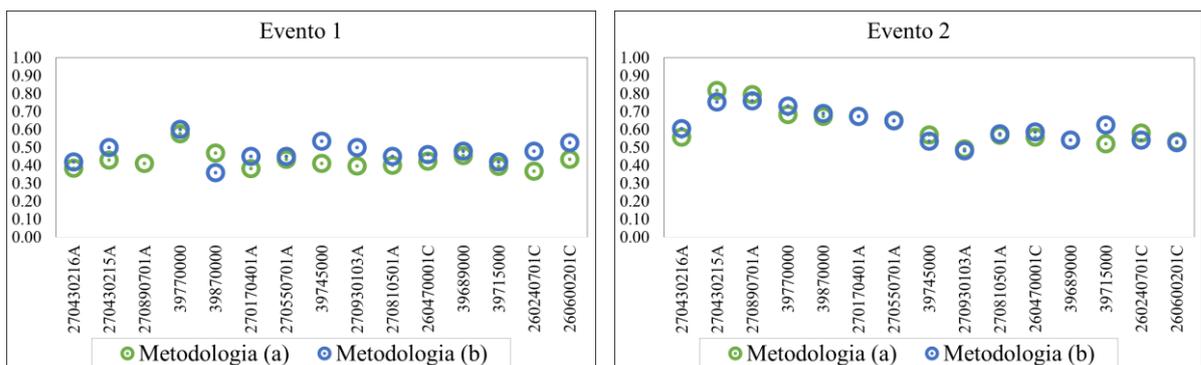


Figura 9 – Razão de acurácia (AR) da chuva em diferentes estações pluviométricas.



O emprego da metodologia (b) que fez uso da mediana dos pontos da malha (3x3), trouxe variações (para mais ou para menos) em algumas estações. As diferenças não foram significativas em maior parte das estações, sendo as maiores diferenças em torno de 0,2.

Os resultados dos modelos Z-R provenientes do produto PPI não são apresentados porque apresentaram valores bem acima do observado.

4.3 Estatísticas quantitativas de chuva

A avaliação dos erros das estimativas de chuva para o evento 1 e 2 estão apresentados nas Figura 10 e Figura 11, respectivamente.

Figura 10 – Evento 1: Estatísticas de quantificação.

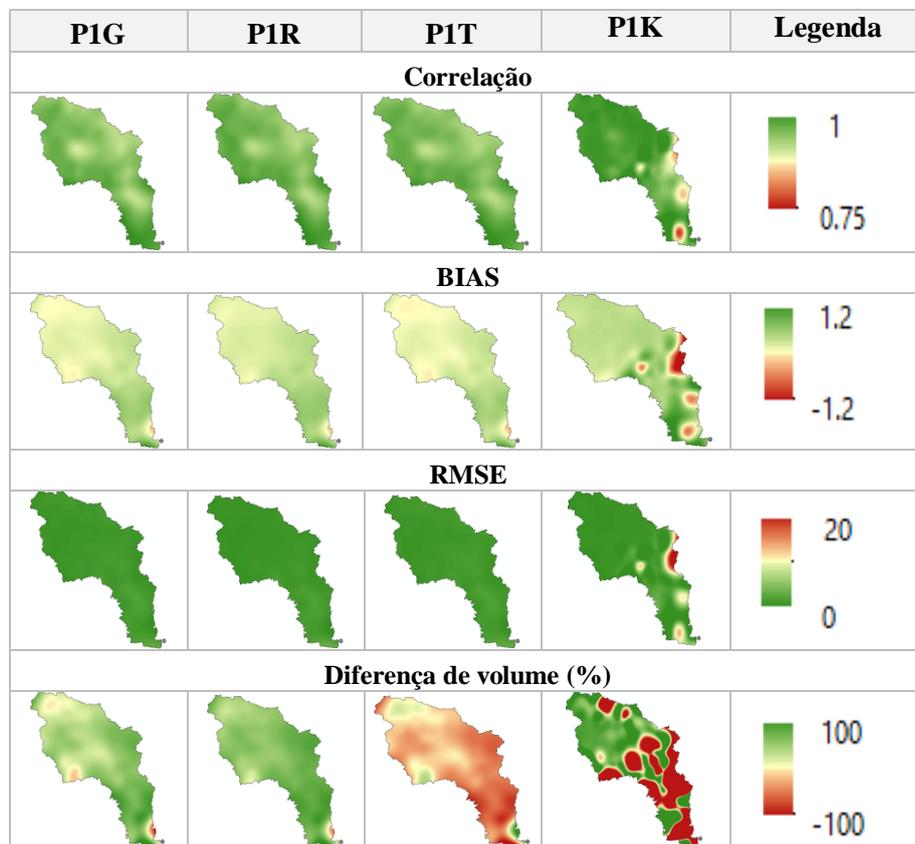
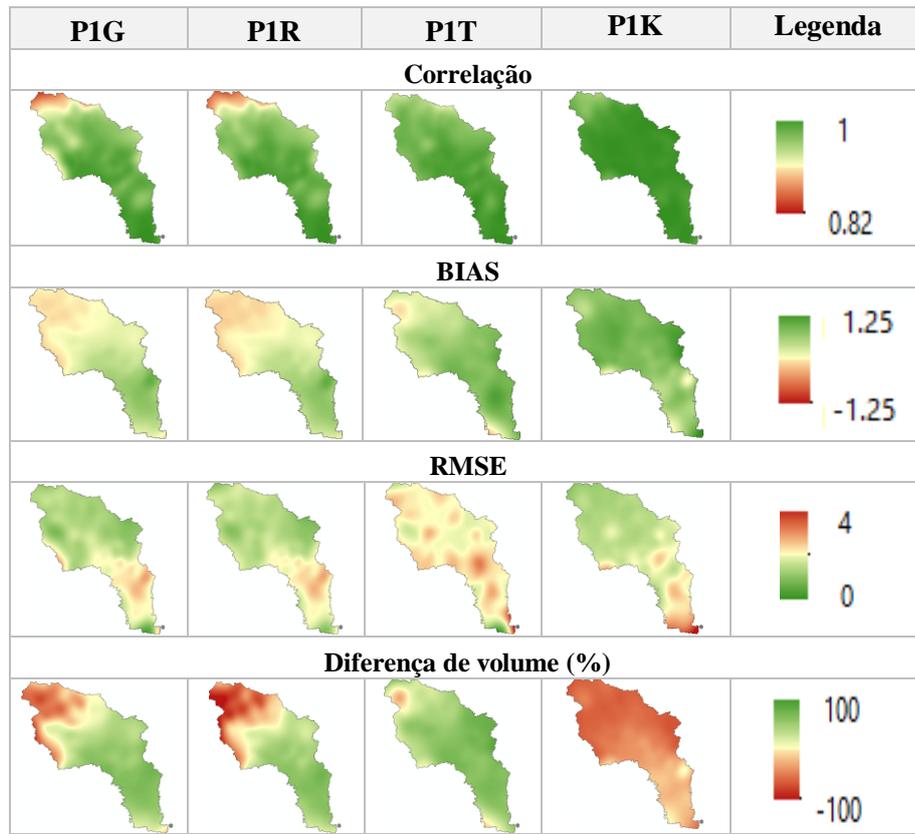
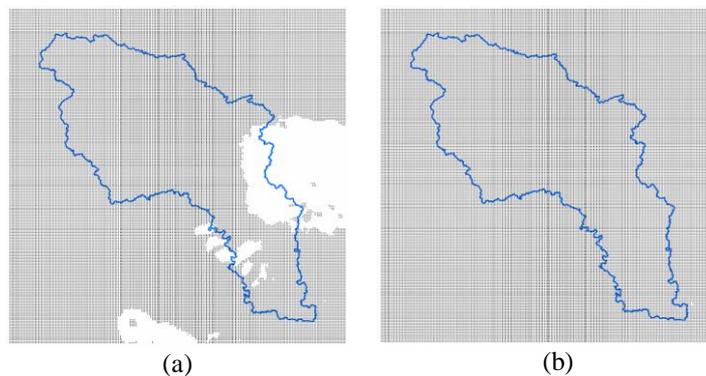


Figura 11 – Evento 2: Estatísticas de quantificação.



Com relação ao evento 1, que apresenta erros na região média da bacia, mais precisamente no lado direito, os altos valores de erro podem ser justificados devido à falha do radar nessa região. Conforme ilustrado na Figura 12, os dados do evento 1 apresentam falha (ausência de dados), logo, estamos comparando o dado observado com o valor nulo, quando na verdade aquela região poderia ter informação de chuva diferente de 0.

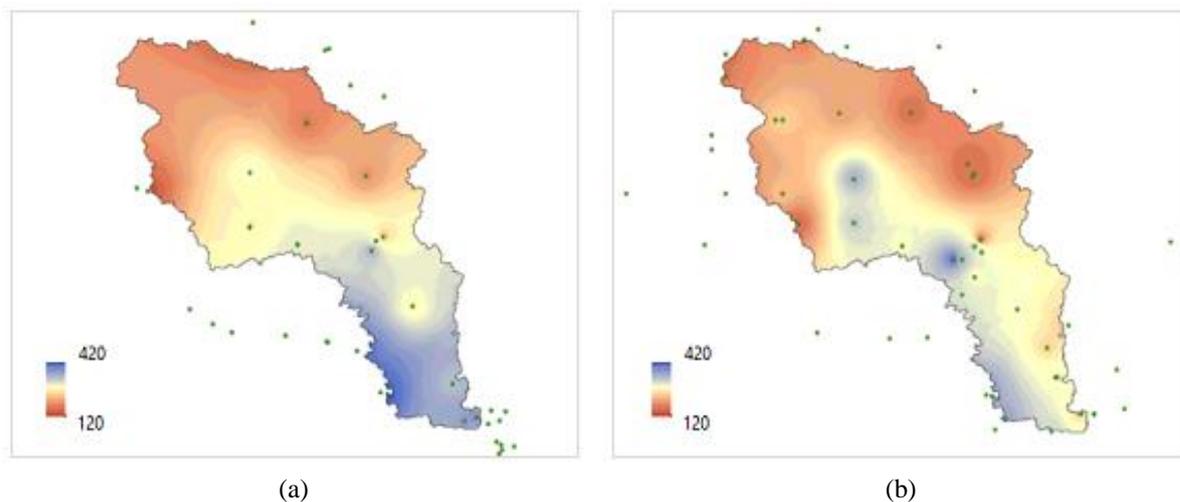
Figura 12 – Malha do radar, (a) evento 1 e (b) evento 2.



No que se refere ao evento 2, a parte baixa da BHRM apresentou maiores erros, apesar da maior proximidade da região com o radar. Diante dos resultados apresentados anteriormente, foi necessário avaliar a influência da densidade da rede de pluviômetros. Como a calibração

realizada por Queiroz (2018), fez uso de dados horários, foi realizado um comparativo entre a rede de estações pluviométricas com dados horários e com dados diários. Os cenários gerados usando o evento 2 estão apresentados na Figura 13.

Figura 13 – Isoietas usando: (a) estações horárias e (b) estações diárias.



Diante dos cenários apresentados na Figura 13, observa-se que a rede de estações horárias atribui um maior volume de chuva na parte baixa da bacia, o que poderia justificar que os erros tenham sido maiores nessa região apesar da proximidade com o radar meteorológico.

4.4 Modelagem hidrológica

Os hidrogramas estimados a partir do produto CAPPI para os eventos 1 e 2 são apresentados na Figura 14 e Figura 15, respectivamente.

Figura 14 – Comparação entre os hidrogramas simulados (gerados a partir dos produtos CAPPI) e observados para o evento 1.

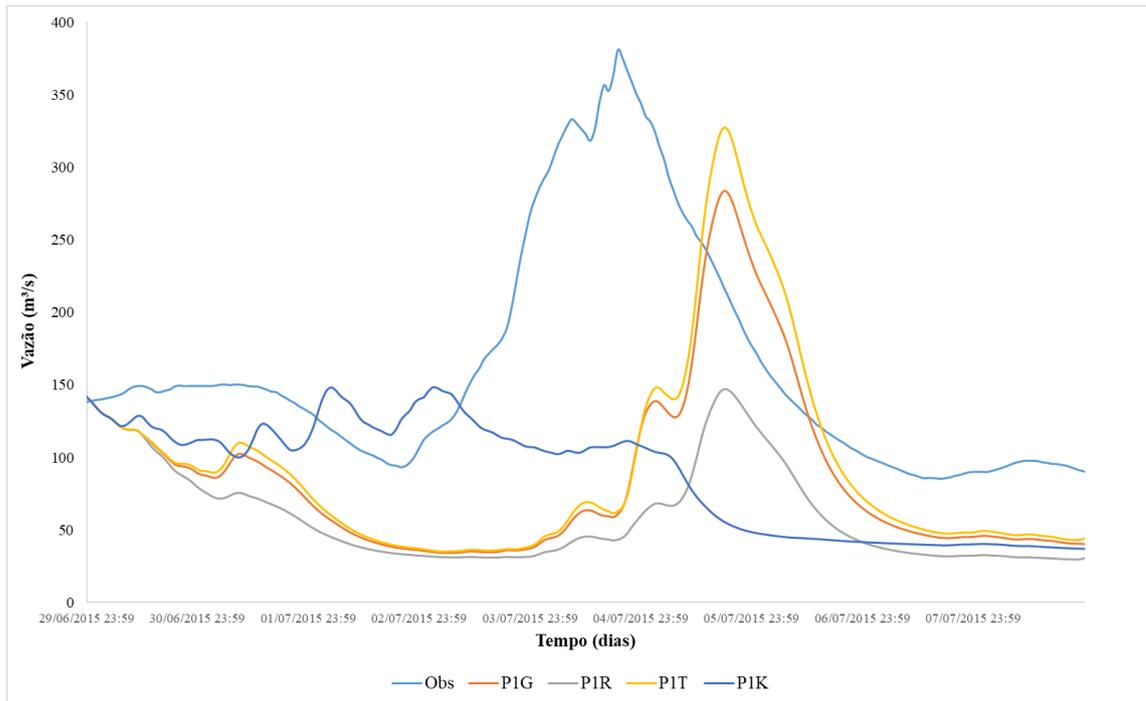
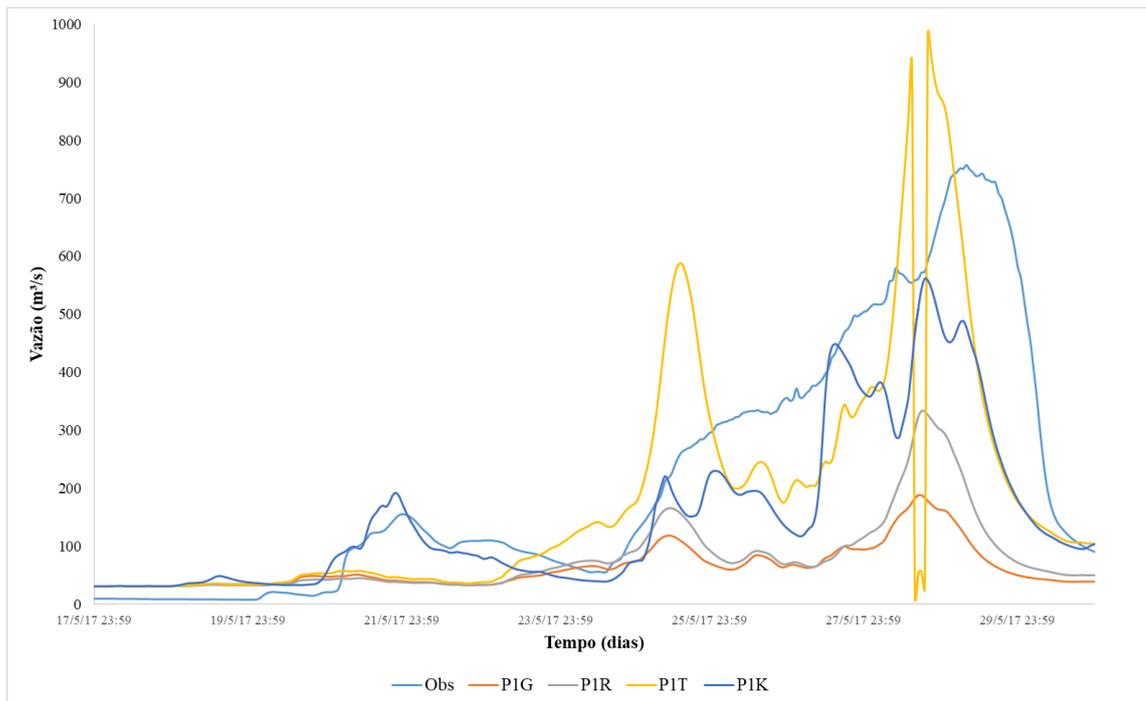
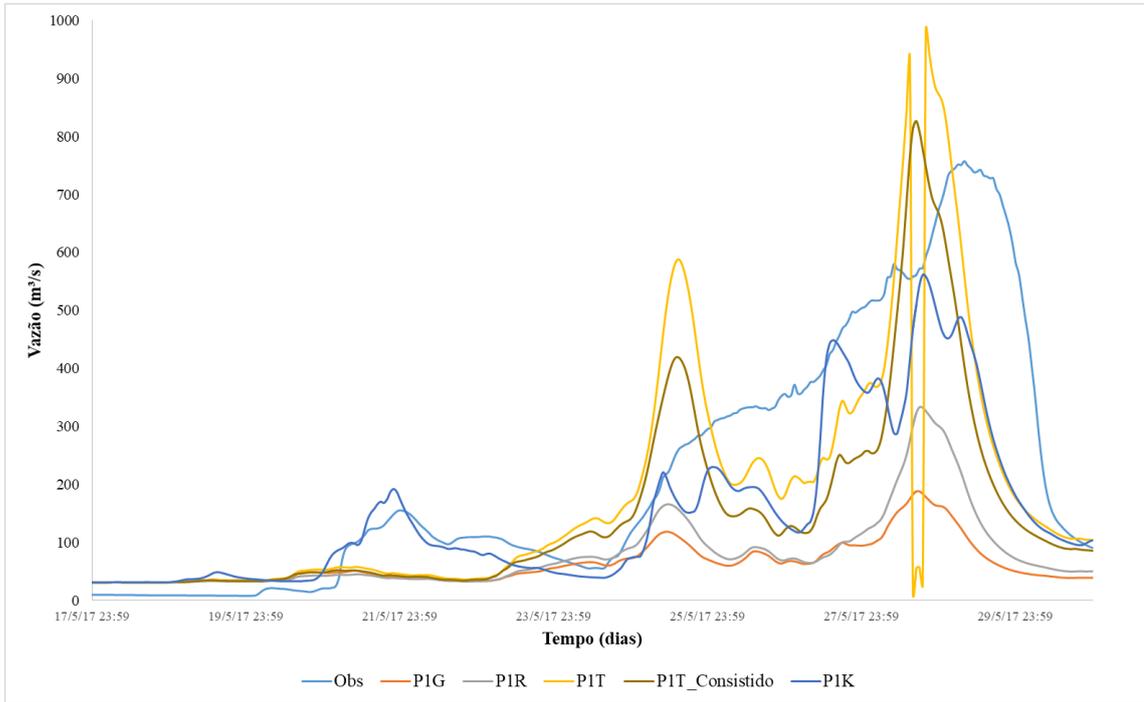


Figura 15 – Comparação entre os hidrogramas simulados (gerados a partir dos produtos CAPPI) e observados para o evento 2.



Como o modelo PIT se comportou de forma anômala no evento de maio de 2017, foi realizada uma consistência das estimativas do modelo PIT, seguindo a metodologia proposta por Sant' Anna (1995), descrita anteriormente. O hidrograma simulado após a análise de consistência está apresentado na Figura 16.

Figura 16 – Simulação do hidrograma simulado após a análise de consistência nas estimativas de chuva do modelo PIT para o evento 2.



Baseado nos estudos de Cabral et al. (2016) e Queiroz (2018), foi empregado um fator de correção de 60%, os resultados estão apresentados na Figura 17 e Figura 18.

Figura 17 – Evento 1: Cenários gerados a partir do produto CAPPI, empregando $F_c=1,6$.

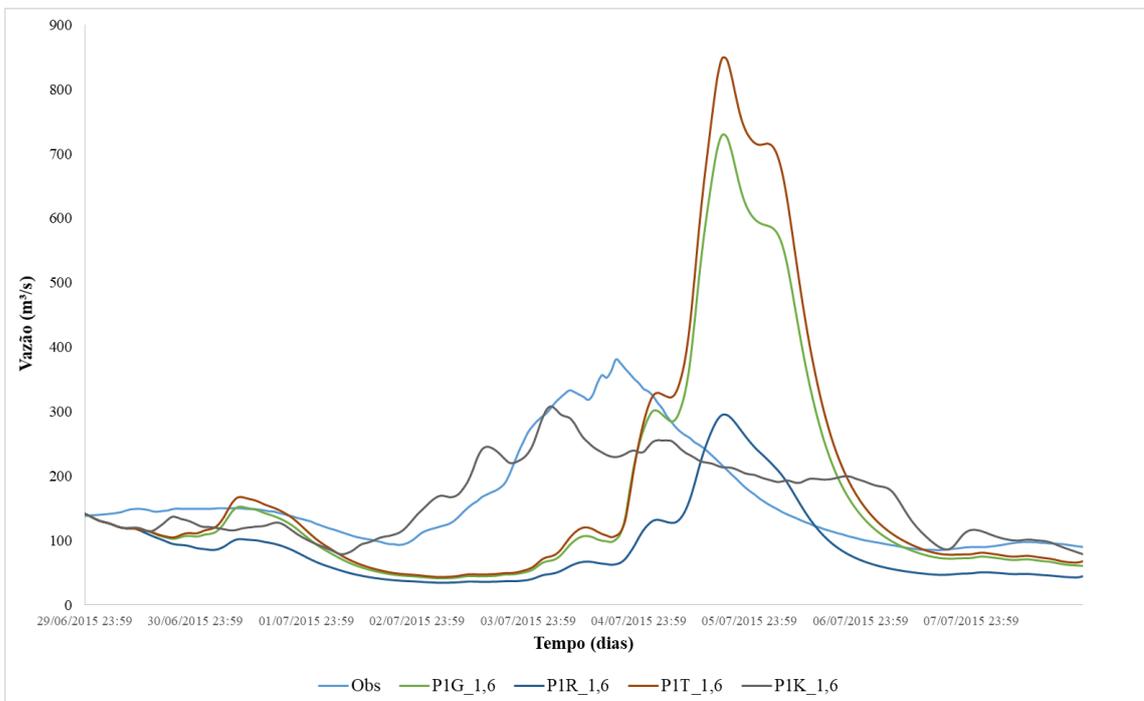
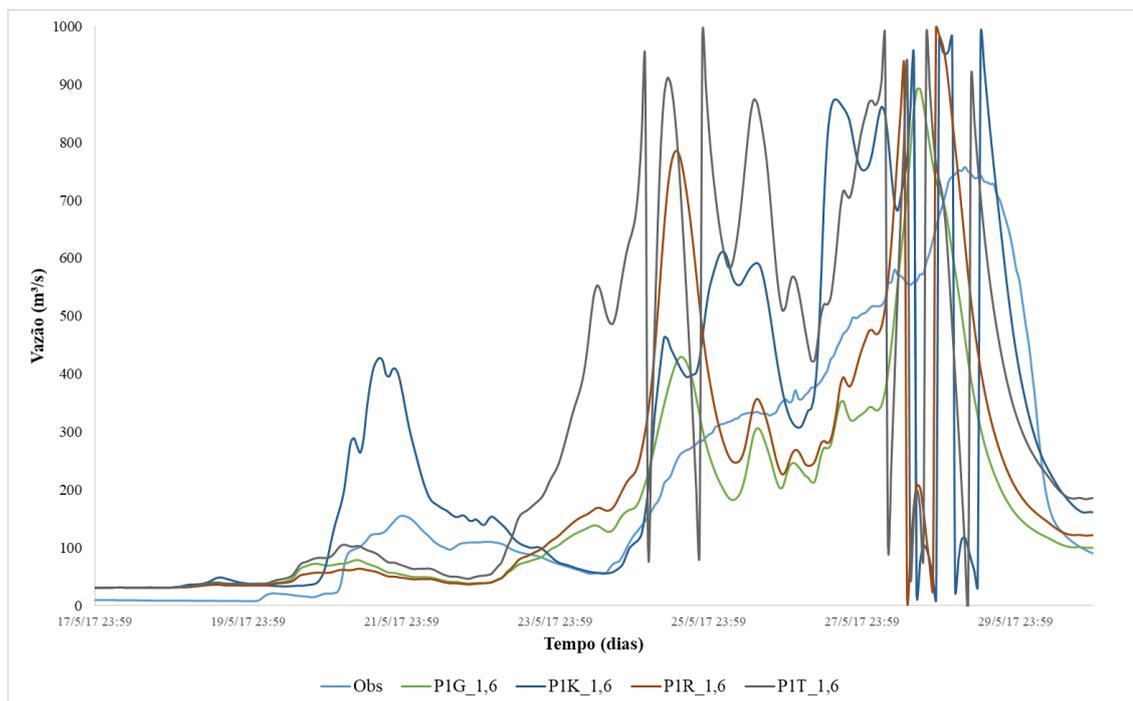


Figura 18 – Evento 2: Cenários gerados a partir do produto CAPPI, empregando $F_c=1,6$.

No tocante do produto PPI, foram gerados os cenários para os dois modelos, no entanto, esses resultados não são apresentados pois mostraram hidrogramas anômalos devido à superestimativa da chuva (conforme mostrado no item 4.1).

Durante o desenvolvimento deste trabalho, especificamente na construção dos resultados apresentados no item 4.3, foi identificado que algumas estações utilizadas por Queiroz (2018) apresentavam inconsistência nos dados. Diante disso, foi realizada uma nova calibração automática excluindo as estações pluviométricas inconsistentes. Os cenários gerados a partir do novo conjunto de parâmetros estão apresentados nas Figura 19 e Figura 20.

Figura 19 – Evento 1: Cenários gerados a partir do produto CAPPI, com a nova calibração automática.

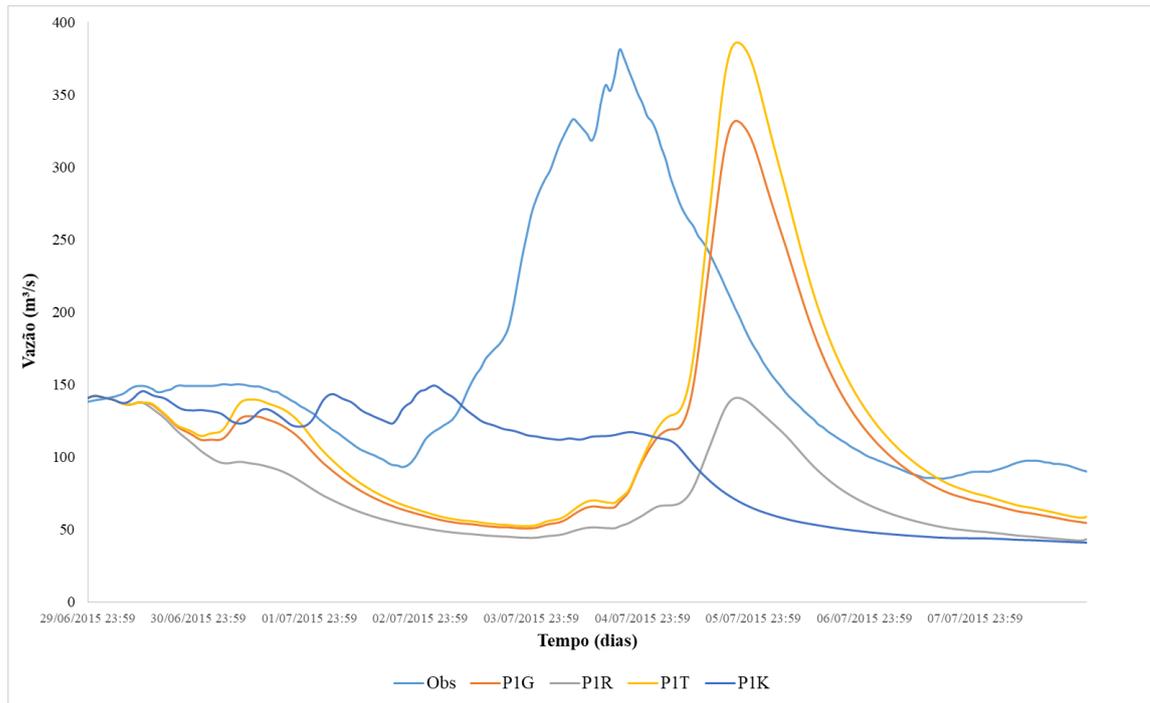
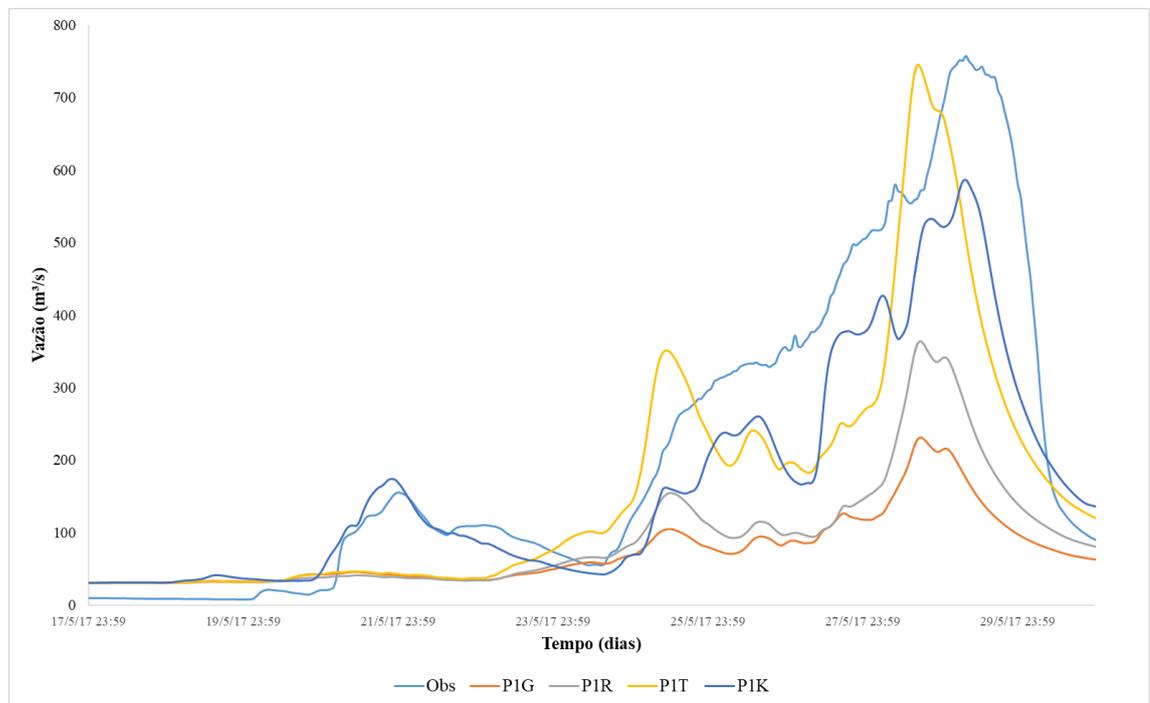


Figura 20 – Evento 2: Cenários gerados a partir do produto CAPPI, com a nova calibração automática.



O Quadro 7 apresenta a comparação do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS), usando o conjunto de parâmetros da calibração automática realizada por Queiroz (2018) e o novo conjunto gerado a partir deste trabalho.

Quadro 7 – Calibração 1 e 2: Comparativo do coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS).

	Evento 1				Evento 2			
	P1G	P1R	P1T	P1K	P1G	P1R	P1T	P1K
Calibração 1	0,321	0,123	0,336	0,343	0,265	0,394	0,649	0,729
Calibração 2	0,365	0,25	0,342	0,428	0,328	0,468	0,727	0,797

A fim de avaliar os cenários diante do novo conjunto de parâmetros, foram estudadas quatro variáveis para comparar o valor observado e o modelado, os resultados estão apresentados nos Quadro 8 e Quadro 9.

Quadro 8 – Evento 1: Comparação dos cenários, usando a nova calibração automática.

	Registro do pico	$Q_{p_{cal}}/Q_{p_{obs}}$	$Q_{p_{cal}} - Q_{p_{obs}}$ (m ³ /s)	Erro T_p (h)	NS
Observado	04/07 – 18:59	-	-	-	-
P1G	05/07 – 19:59	0,871	-49,16	25 ⁺	0,365
P1R	05/07 – 22:59	0,361	-243,34	28 ⁺	0,250
P1T	05/07 – 21:59	1,004	1,57	27 ⁺	0,342
P1K	03/07 – 00:59	0,385	-234,51	18 ⁻	0,428

Quadro 9 – Evento 2: Comparação dos cenários, usando a nova calibração automática.

	Registro do pico	$Q_{p_{cal}}/Q_{p_{obs}}$	$Q_{p_{cal}} - Q_{p_{obs}}$ (m ³ /s)	Erro T_p (h)	NS
Observado	29/05 – 06:59	-	-	-	-
P1G	28/05 – 19:59	0,298	-526,76	11 ⁻	0,328
P1R	28/05 – 19:59	0,469	-398,91	11 ⁻	0,468
P1T	28/05 – 16:59	0,987	-10,04	14 ⁻	0,727
P1K	29/05 – 08:59	0,773	-170,54	2 ⁺	0,797

5 DISCUSSÕES

5.1 Análise preliminar das estimativas de chuva pelo radar

Embora o produto PPI realize uma leitura com menor grau de elevação (mais próxima do solo), são mais susceptíveis aos ruídos e ecos do terreno. Já o produto CAPPI realiza muita interpolação principalmente quanto mais afastado do radar, suprimindo as falhas geralmente encontradas nos dados PPI.

Um problema muito comum no produto PPI é a interferência causada por características atmosféricas (CALHEIROS e ZAWADZKIB, 1986) e características do solo, conhecidos como ecos de terreno. Normalmente essas contaminações são confundidas com áreas de precipitação devido à semelhança espacial e intensidade.

O produto PPI se mostrou inadequado para este estudo. Mesmo após o uso de um filtro nos valores para consistência dos dados, os mesmos não apresentaram uma boa correspondência perante os dados observados.

5.2 Estatísticas de ocorrência de chuva

No que se refere à probabilidade de detecção de chuva (POD), não foi identificado um comportamento nos valores de POD entre as estações quando comparado os dois eventos. Foram observados maiores valores de POD para o evento 2.

O evento 1 foi caracterizado pela combinação de Cavados com o Anticiclone Subtropical do Atlântico Sul (ASAS). Estes eventos não estão necessariamente associados à núcleos convectivos. Já o evento 2, foi classificado meteorologicamente como Ondas de Leste (OL), que é um sistema caracterizado por nuvens de núcleos convectivos. (HENKEN, 2009) mostrou que o radar detecta mais facilmente fenômenos com núcleos de nuvens convectivas. Desta forma, o melhor desempenho de POD para o evento 2 provavelmente ocorreu devido ao sistema meteorológico atuante.

À medida que a distância entre a estação e o radar aumenta, a razão de falso alarme (FAR) apresenta uma tendência de crescimento, indicando maior falha. Já a razão de acurácia (AR) mostra um decaimento, evidenciando maiores erros. Esse comportamento corrobora o que foi identificado em alguns estudos (HUFF, 1967; CALHEIROS e ZAWADZKIB, 1986; NIKAHD, 2018).

5.3 Estatísticas quantitativas de chuva

Para os dois eventos, o modelo P1K apresentou o pior desempenho, corroborando que o emprego da relação Z-R local aprimora as estimativas de chuva providas do radar

meteorológico (CALHEIROS e ZAWADZKIB, 1986; RENDON et al., 2010; RAMLI et al., 2011; LIBERTINO et al., 2015; NIKAHD, 2018).

O modelo P1T - que emprega duas equações Z-R (convectiva e estratiforme) - apresentou melhor desempenho para o evento 1, no entanto, para o evento 2 este modelo apenas apresentou uma performance superior em relação ao modelo P1K. Todavia, conforme visto no item 0, foi necessário empregar a consistência de dados para o modelo P1T devido à contaminação dos valores por ruídos.

De modo geral, o modelo P1G apresenta o melhor desempenho para ambos os eventos. A diferença entre os modelos P1G e P1R é que o segundo modelo emprega a dupla polarização, que implica na inserção dos parâmetros Zdr e Kdp. No evento 1, o modelo P1R apresentou melhor desempenho quando comparado ao P1G, diferentemente no evento 2 que apresentou um maior volume de chuva. É conhecido que a dupla polarização traz ganhos apenas em chuvas com baixas intensidades (menor que 7 mm/h) e que este modelo pode aumentar os totais de precipitação em cerca de 40% (AMITAI et al., 2005), o que pode explicar a perda de performance do modelo P1R no evento 2.

Sebastianelli et al. (2010), identificaram que os erros são incrementados na estimativa de precipitação por radar à medida que a distância entre o posto de observação e o radar aumentam. Neste trabalho foi identificado que, para ambos os eventos, existe uma forte correlação na parte baixa da bacia, no entanto, para a mesma região os erros são maiores. Os maiores erros encontrados no trecho baixo da bacia podem estar associados à densidade da rede horária de monitoramento, ao invés de limitações para estimativa da chuva por radar. Analisando os cenários apresentados nas Figura 10 e Figura 11, nota-se que a rede de estações horárias atribui um maior volume de chuva à parte baixa da BHRM, o que justifica o comportamento apresentado nos eventos 1 e 2. Segundo Chen et al. (2016), a densidade da rede pluviométrica, é fator limitante para caracterizar a distribuição espacial e temporal da precipitação em uma bacia hidrográfica.

5.4 Modelagem hidrológica

A Figura 14 mostra que para o evento 1, as estimativas de vazão usando os modelos P1G e P1T se aproximam mais do hidrograma observado. No que se refere ao evento 2 (Figura 15), o modelo P1T apresentou um hidrograma anômalo, indicando inconsistência nas estimativas de chuva. O filtro foi aplicado no modelo P1T (Figura 16), melhorando significativamente o hidrograma gerado. Para este evento, os modelos com melhor desempenho foram P1T e P1K.

Cabral et al. (2016), utilizaram o erro médio sobre os dados do radar seguindo o resultado obtido por Brandes (1975) e Barnes (1964), aplicando uma subestimativa de 60% ($F_c=1,6$) na bacia hidrográfica do rio São Miguel que está situada entre a Zona da Mata e o Agreste Alagoano. O mesmo fator foi aplicado por Queiroz (2018) para a BHRM, que utilizou a relação de Marshall-Palmer para realizar as estimativas de chuva. Para o presente estudo, a aplicação do fator de correção causou uma superestimativa dos hidrogramas (Figura 17 e

Figura 18), diferentemente do que ocorreu no trabalho de Queiroz (2018), sugerindo que o emprego do fator de correção não é apropriado às equações Z-R locais.

A partir da nova calibração automática (Figura 19 e Figura 20), as simulações mostraram que o novo conjunto de parâmetros aproximou os picos dos hidrogramas calculados do observado. Além disso, foi observado um ganho significativo nos valores de NS para os dois eventos (Quadro 7).

O modelo que emprega a relação Z-R de Marshall-Palmer (P1K) apresentou os melhores valores para o coeficiente Nash-Sutcliffe (NS). Todavia, conforme pode ser visto nas Figura 19 e Figura 20, de modo geral, o uso das relações Z-R locais permitiram reproduzir melhor os picos dos hidrogramas (Quadro 8 e Quadro 9). Com relação ao erro no tempo de pico (T_p), o modelo P1K se destaca quando comparado aos modelos P1G, P1R e P1T. Em ambos os eventos, a diferença entre o tempo de pico do dado observado e do radar são menores para o modelo P1K. Outro comportamento observado é que quando o modelo que usa a Z-R de Marshall-Palmer antecipa o tempo de pico, ocorre um retardo para os modelos que empregam as Z-R locais, e vice-versa. No que diz respeito à diferença entre as vazões de pico (Q_p), o modelo P1T que emprega duas relações Z-R (convectiva e estratiforme) é o que apresenta os menores valores para os dois eventos.

Eventos com altas taxas de precipitação apresentam maiores erros na estimativa da chuva provinda do radar meteorológico. A diferença entre a chuva estimada pelo radar meteorológico e o dado observado tem relação com as características da precipitação, e com a resolução espacial e temporal dos dados (ZHU et al., 2014).

Foi observado que a dupla polarização faz com que o desempenho do modelo P1R caia substancialmente para os dois eventos, sendo inclusive superado pela Z-R de Marshall-Palmer que não é local. Embora a literatura aponte que a dupla polarização possa estimar a taxa de chuva, com maior precisão do que a polarização simples (CAREY e RUTLEDGE, 2000; KUMJIAN, 2013), isso não ocorreu para os eventos abordados no presente estudo.

Os cenários mostraram que as relações Z-R desenvolvidas para Alagoas proporcionaram ganho na representação do hidrograma, especialmente o modelo PIT que emprega duas relações Z-R (convectiva e estratiforme).

6 CONCLUSÕES

O presente estudo avaliou o desempenho do modelo hidrológico MGB-IPH utilizando como entrada a chuva estimada pelo radar meteorológico, explorando os produtos CAPPI e PPI (com polarização simples e dupla), empregando relações Z-R específicas desenvolvidas para Alagoas, e a relação de Marshall-Palmer desenvolvida para os EUA.

Os modelos P1G e P1R empregavam a Z-R geral de Alagoas, o segundo modelo adotava a dupla polarização, esta metodologia fez com que o desempenho desta Z-R caísse substancialmente para os dois eventos, sendo inclusive superada pela Z-R de Marshall-Palmer que não é local, mostrando que para os eventos abordados neste estudo, não é viável a aplicabilidade dessa tecnologia.

Os resultados mostraram que o modelo chuva-vazão apresentou melhor desempenho para as relações Z-R locais, especialmente para o modelo P1T que emprega as equações convectiva e estratiforme.

Observou-se que as estimativas do radar utilizadas no presente estudo tendem a subestimar a precipitação observada. No entanto, o radar meteorológico mostra-se uma alternativa promissora por se tratar de dados de alta resolução nas estimativas de precipitação, superando as limitações da rede pluviométrica na representação espacial e temporal da chuva ou mesmo melhor a rede já existente.

Espera-se que os resultados obtidos venham a contribuir na geração de informação para bacia do rio Mundaú, fornecendo subsídios aos gestores no planejamento dos recursos hídricos e políticas públicas que venham resultar em medidas mitigadoras aos efeitos adversos das inundações para bacia do rio Mundaú.

Diante do bom desempenho das relações Z-R locais quando comparadas à de Marshall-Palmer, entende-se que o desenvolvimento de uma Z-R específica para a bacia do rio Mundaú traria ganhos significativos à modelagem chuva-vazão.

Recomenda-se que os trabalhos futuros ampliem o número de eventos estudados e investigue a influência dos sistemas meteorológicos causadores de chuva no desempenho da relação Z-R empregada.

Entende-se que as estimativas de chuva provindas do radar meteorológico possuem falhas e incertezas, no entanto, o radar mostra-se como uma ferramenta promissora no prognóstico de eventos de cheias utilizando previsões em curto prazo, auxiliando no envio de alertas antecipados que são fundamentais na prevenção dos impactos trazidos por episódios de cheia.

7 REFERÊNCIAS

- ALVES, J.M., TEIXEIRA, R.F.B., FERREIRA, A. G. **Um Intenso Sistema Convectivo de Mesoescala no Setor Leste do Nordeste: O Caso de 20 a 21 de maio de 1999**. Revista Brasileira de Meteorologia, 2001.
- ALVES, A. L. **Efeito de Teleconexões Climáticas na Variabilidade Espaço-Temporal dos Índices de Disponibilidade Hídrica em Uma Bacia Hidrográfica sob Transição Climática (Tropical / Semiárido)**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Universidade Federal de Alagoas, 2016.
- AMITAI, E.; LIAO, L.; LLORT, X.; MENEGHINI, R. **Accuracy verification of spaceborne radar estimates of rain rate**. Atmospheric Science Letters, v. 6, n. 1, p. 2–6, 2005.
- ANTÔNIO, M. A. **Técnica de ajuste em tempo real de medidas de chuva com radar**. 1998. Universidade Estadual Paulista, 1998.
- ANTONIO, M. D. A. **Considerações sobre integração de medidas de chuva por radar**. 1984. Universidade de São Paulo, 1984.
- BARNES, S. L. **A technique for maximizing details in numerical weather map analysis**. Journal of Applied Meteorology, 1964.
- BASTOS, C. C.; FERREIRA, N. J. **Análise climatológica da Alta Subtropical do Atlântico Sul**. Congresso Brasileiro de Meteorologia, p. 612–619, 2000.
- BRANDES, E. A. **Optimizing rainfall estimates with the aid of radar**. Journal of Applied Meteorology, 1975.
- BRITO, B. M. D. E.; LEVIT, V.; FEDOROVA, N.; MOLION, L. C. B.; TENÓRIO, R. S.; RODRIGUES, R. N.; SILVA, B. F. P. D. A.; FEDERAL, U.; UFAL, D. A. **Análise Do Comportamento Das Trovoadas No Estado De Alagoas , Previsão À Curto Prazo**. n. 2000, p. 243–256, 2011.
- CAREY, L. D.; RUTLEDGE, S. A. **The Relationship between Precipitation and Lightning in Tropical Island Convection: A C-Band Polarimetric Radar Study**. Monthly Weather Review, v. 128, n. 8, p. 2687–2710, 2000.
- CECINATI, F.; RICO-RAMIREZ, M. A.; HEUVELINK, G. B. M.; HAN, D. **Representing radar rainfall uncertainty with ensembles based on a time-variant geostatistical error modelling approach**. Journal of Hydrology, v. 548, p. 391–405, 2017.
- CHAVES, M. B. **Simulação hidrometeorológica em bacia semiárida / tropical através de um modelo atmosférico-hidrológico acoplado**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Universidade Federal de Alagoas, 2015.
- CHEN, X.; ZHANG, L.; GIPPEL, C. J.; SHAN, L.; CHEN, S.; YANG, W. **Uncertainty of Flood Forecasting Based on Radar Rainfall Data Assimilation**. Advances in Meteorology, v. 2016, 2016.
- CHUMCHEAN, S.; SEED, A.; SHARMA, A. **Correcting of real-time radar rainfall bias using a Kalman filtering approach**. Journal of Hydrology, v. 317, n. 1, p. 123–137, 2006.

- CIFELLI, R.; CHANDRASEKAR, V.; LIM, S.; KENNEDY, P. C.; WANG, Y.; RUTLEDGE, S. A. **A new dual-polarization radar rainfall algorithm: Application in Colorado precipitation events.** *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 28, n. 3, p. 352–364, 2011.
- COELHO-ZANOTTI, M. S. S. ; GAN, M. A. ; CONFORTE, J. C. **Estudo Da Variabilidade Da Posição E Da Nebulosidade Associada À ZCIT do Atlântico, Durante a Estação Chuvosa de 1998 e 1999 no Nordeste do Brasil.** *Revista Brasileira de Meteorologia*, 2004.
- COLLIER, C. G. **Weather Radar Precipitation Data And Their Use In Hydrological Modelling BT - Distributed Hydrological Modelling.** p. 143–163, 1996.
- COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica em grandes bacias.** 2001. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.
- COSTA, D. D. **Previsão Hidrológica de Longo-Prazo baseada em Componentes Climáticas em Bacias Hidrográficas Semiáridas / Tropicais.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Universidade Federal de Alagoas, 2014.
- COSTA, D. D.; DA SILVA PEREIRA, T. A.; FRAGOSO, C. R.; MADANI, K.; UVO, C. B. **Understanding Drought Dynamics during Dry Season in Eastern Northeast Brazil.** *Frontiers in Earth Science*, v. 4, n. June, 2016.
- COUTINHO, E. C., FISCH, G. **Distúrbios Ondulatórios de Leste (Dols) na Região do Centro de Lançamento de Alcântara-MA.** *Revista Meteorologia, Brasileira de*, 2007.
- CRUZ, C. D. **Determinação sinótica dos fatores que favorecem as influências frontais sobre o Estado de Alagoas.** 2008. Universidade Federal de Alagoas, 2008.
- FRAGOSO JÚNIOR, C. R.; PEDROSA, V. A.; SOUZA, V. C. **Reflexões Sobre a Cheia de Junho de 2010 nas Bacias do Rio Mundaú e Paraíba.** XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, p. 1–20, 2010.
- FRANZ, K. J.; HOGUE, T. S. **Evaluating uncertainty estimates in hydrologic models: Borrowing measures from the forecast verification community.** *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 15, n. 11, p. 3367–3382, 2011.
- GEMIACKI, L. **Atuação de Sistemas Frontais na Estação Seca do Nordeste do Brasil.** 2005. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Meteorologia. Universidade Federal de Alagoas, 2005.
- HENKEN, C. C. **Detection of Cb and TCu clouds.** n. September, p. 97, 2009.
- HOSSAIN, F.; ANAGNOSTOU, E. N.; DINKU, T.; BORGA, M. **Hydrological model sensitivity to parameter and radar rainfall estimation uncertainty.** *Hydrological Processes*, v. 18, n. 17, p. 3277–3291, 2004.
- HUFF, F. A. **The adjustment of radar estimates of storm mean rainfall with rain gage data.** *Journal of Applied Meteorology*, 1967. .
- JAVIER, J. R. N.; SMITH, J. A.; MEIERDIERCKS, K. L.; BAECK, M. L.; MILLER, A. J.

Flash Flood Forecasting for Small Urban Watersheds in the Baltimore Metropolitan Region. *Weather and Forecasting*, v. 22, n. 6, p. 1331–1344, 2007.

JORDAN, P.; SEED, A.; AUSTIN, G. **Sampling errors in radar estimates of rainfall.** *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, v. 105, n. D2, p. 2247–2257, 2000.

KAVETSKI, D.; KUCZERA, G.; FRANKS, S. W. **Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 1. Theory.** *Water Resources Research*, v. 42, n. 3, p. 1–10, 2006.

KRZYSZTOFOWICZ, R. **Bayesian forecasting via deterministic model.** *Risk Analysis*, v. 19, n. 4, p. 739–749, 1999.

KRZYSZTOFOWICZ, R. **The case for probabilistic forecasting in hydrology.** *Journal of Hydrology*, v. 249, n. 1, p. 2–9, 2001.

KUMJIAN, M. R. **Principles and Applications of Dual-Polarization Weather Radar.** Part I: Description of the Polarimetric Radar Variables. *Journal of Operational Meteorology*, 2013.

LIBERTINO, A.; ALLAMANO, P.; CLAPS, P.; CREMONINI, R.; LAIO, F. **Radar estimation of intense rainfall rates through adaptive calibration of the Z-R relation.** *Atmosphere*, v. 6, n. 10, p. 1559–1577, 2015.

MANDAPAKA, P. V.; KRAJEWSKI, W. F.; CIACH, G. J.; VILLARINI, G.; SMITH, J. A. **Estimation of radar-rainfall error spatial correlation.** *Advances in Water Resources*, v. 32, n. 7, p. 1020–1030, 2009.

MARSHALL, J. S.; PALMER, W. M. **The distribution of raindrops with size.** *Journal of Meteorology*, 1948. .

MÉNDEZ-ANTONIO, B.; CAETANO, E.; SOTO-CORTÉS, G.; RIVERA-TREJO, F. G.; CARVAJAL RODRÍGUEZ, R. A.; WATTS, C. **Weather Radar Data and Distributed Hydrological Modelling: An Application for Mexico Valley.** *Open Journal of Modern Hydrology*, v. 03, n. 02, p. 79–88, 2013.

MIGUEL, H. **Uso de dados de radar meteorológico em modelo hidrológico scs-cn para estimativa.** Dissertação Curso de Mestrado do em Sensoriamento Remoto , orientada pelo Dr . Camilo Daleles Rennó ,. 2018.

MISHRA, S. K.; RAO, V. B.; FRANCHITO, S. H. **Genesis of the Northeast Brazil Upper-Tropospheric Cyclonic Vortex: A Primitive Equation Barotropic Instability Study.** *Journal of the Atmospheric Sciences*, v. 64, n. 4, p. 1379–1392, 2007.

MOLION, L. C. B.; CALHEIROS, A. J. P. **Eventos críticos no nordeste do Brasil: o evento de janeiro de 2004.** Congresso Brasileiro De Meteorologia, 2004.

MONTE, B. E. O. **Mapeamento de inundações no município de Rio Largo (AL).** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Universidade Federal de Alagoas, 2013.

NIKAHD, A. **Altitudes Effects in Calibration of Ground Doppler Radar for Rainfall Estimation.** v. 1, n. 5, 2018.

- NIKOLOPOULOS, E. I.; ANAGNOSTOU, E. N.; HOSSAIN, F.; GEBREMICHAEL, M.; BORGA, M. **Understanding the Scale Relationships of Uncertainty Propagation of Satellite Rainfall through a Distributed Hydrologic Model.** *Journal of Hydrometeorology*, v. 11, n. 2, p. 520–532, 2010.
- PEREIRA, M.; KAYSER, R. B.; COLLISCHONN, W. **Integração do Modelo Hidrológico para Grandes Bacias MGB - IPH e Sistemas de Informação Geográfica para suporte à decisão de outorga de direito de uso da água.** *Rega*, v. 9, n. 2, p. 21–33, 2012.
- PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D. **Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões.** v. 20, p. 888–904, 2015.
- PRAT, O. P.; BARROS, A. P. **Exploring the transient behavior of Z-R relationships: Implications for radar rainfall estimation.** *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 48, n. 10, p. 2127–2143, 2009.
- QUEIROZ, K. D. S. **Simulação de eventos extremos de cheia de curto-prazo usando precipitação estimada por radar.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento. Universidade Federal de Alagoas, 2018.
- R. V. CALHEIROS AND I. ZAWADZKIB. **Reflectivity-Rain Rate Relationships for Radar Hydrology in Brazil.** *Journal of Climate and Applied Meteorology*, v. 26, p. 118–132, 1986.
- RAMLI, S.; TAHIR, W.; A.B., S. H. **New Z / R Relationships for Klang River Basin , Malaysia.** *World Academy of Science, Engineering and Technology*, v. 8, n. Chuser, p. 248–251, 2011.
- RENDON, S.; VIEUX, B.; PATHAK, C. **Estimation of regionally specific Z-R relationships for radar-based hydrologic prediction.** In *Proceedings of the World Environmental and Water Resources Congress*, v. 2, p. 4668–4680, 2010.
- RICO-RAMIREZ, M. A.; LIGUORI, S.; SCHELLART, A. N. A. **Quantifying radar-rainfall uncertainties in urban drainage flow modelling.** *Journal of Hydrology*, v. 528, p. 17–28, 2015.
- ROSSA, A. M. **Use of Radar Observations in Hydrological and NWP Models.** *Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere*, v. 25, p. 1221–1224, 27 jul. 2013.
- RYZHKOVA, A. V.; GIANGRANDE, S. E.; SCHUUR, T. J. **Rainfall Estimation with a Polarimetric Prototype of WSR-88D.** *Journal of Applied Meteorology*, v. 44, n. 4, p. 502–515, 2005.
- SAMUELSON LOPES CABRAL; JOJHY SAKURAGI; CLEITON DA SILVA SILVEIRA. **Incertezas e erros na estimativa de vazões usando modelagem hidrológica e precipitação por radar.** *Revista Ambiente & Água*, 2016.
- SANT' ANNA, S. J. S. **Comparação do desempenho de filtros redutores de “speckle”.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto/ Processamento de Imagens)- Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais, p. 2009, 1995.

SARMENTO TENÓRIO, R.; DA, M. C.; MORAES, S.; KWON, B. H. **Raindrop Distribution in the Eastern Coast of Northeastern Brazil Using Disdrometer Data.** v. 254, p. 415–426, 2010.

SEBASTIANELLI, S.; RUSSO, F.; NAPOLITANO, F.; BALDINI, L. **Comparison between radar and rain gauges data at different distances from radar and correlation existing between the rainfall values in the adjacent pixels.** Hydrology and Earth System Sciences Discussions, v. 7, n. 4, p. 5171–5212, 2010.

SOUZA, R. C. De; REIS, R. S.; JÚNIOR, C. R. F.; SOUZA, C. F. **Uma Análise na Dragagem do Complexo Estuarino-Lagunar Mundaú/Manguaba em Alagoas através de um Modelo Numérico Hidrodinâmico Bidimensional – Resultados Preliminares.** RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 9, n. 4, p. 21–31, 2004.

SUK, M.-K.; CHANG, K.-H.; CHA, J.-W.; KIM, K.-E. **Operational Real-Time Adjustment of Radar Rainfall Estimation over the South Korea Region.** Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, v. 91, n. 4, p. 545–554, 2013.

THORND AHL, S.; EINFALT, T.; WILLEMS, P.; ELLERBÆK NIELSEN, J.; TEN VELDHUIS, M. C.; ARNBJERG-NIELSEN, K.; RASMUSSEN, M. R.; MOLNAR, P. **Weather radar rainfall data in urban hydrology.** Hydrology and Earth System Sciences, v. 21, n. 3, p. 1359–1380, 2017.

VERRIER, S.; BARTHÈS, L.; MALLET, C. **Theoretical and empirical scale dependency of Z-R relationships: Evidence, impacts, and correction.** Journal of Geophysical Research Atmospheres, v. 118, n. 14, p. 7435–7449, 2013.

ZHU, D.; XUAN, Y.; CLUCKIE, I. **Hydrological appraisal of operational weather radar rainfall estimates in the context of different modelling structures.** Hydrology and Earth System Sciences, v. 18, n. 1, p. 257–272, 2014.