



## Validação de Estimativas de Precipitação por Radar Meteorológico em uma Bacia Hidrológica na Região Central do Estado de São Paulo, Brasil

Validation of Precipitation Estimates by Weather Radar Data in a River Basin in the Central Region of São Paulo State, Brazil

Bárbara Hass Miguel<sup>1</sup> & Camilo Daleles Rennó<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Departamento de Geociências Aplicadas e Geodinâmica, Campus Universitário Darcy Ribeiro, 70910-900, Brasília, DF, Brasil

<sup>2</sup>Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Departamento de Sensoriamento Remoto, Divisão de Processamento de Imagens, Av. dos Astronautas 1758, 12227-010, São José dos Campos, SP, Brasil

E-mails: [babs.hass@gmail.com](mailto:babs.hass@gmail.com); [camilo@dpi.inpe.br](mailto:camilo@dpi.inpe.br)

DOI: [http://doi.org/10.11137/2020\\_2\\_325\\_339](http://doi.org/10.11137/2020_2_325_339); Recebido: 29/01/2020 Aceito: 08/05/2020

### Resumo

O objetivo do presente trabalho foi validar as estimativas de precipitação do radar meteorológico do Centro de Meteorologia de Bauru (IPMet/UNESP) para a bacia hidrográfica do Rio Jacaré Guaçu, localizada na região central do Estado de São Paulo/Brasil. Para isso, foram utilizados dados de 2013 de 18 estações pluviométricas. A quantificação da precipitação da bacia foi realizada através dos polígonos de Thiessen. Para a validação do radar, foram testadas 3 relações Z-R: Calheiros, Jones e Marshall-Palmer. Os melhores resultados da validação foram obtidos por Marshall-Palmer. Para o ajuste dos dados subestimados do radar meteorológico, utilizou-se um método de otimização nos dados das estações, encontrando o fator de correção de 3,135. Após o ajuste, observou-se uma semelhança entre a média da precipitação observada pelos pluviômetros e a precipitação estimada pelo radar. Sem as devidas correções, a chuva acumulada em 2013 na bacia hidrográfica de acordo com os pluviômetros foi de 1252,26 mm, enquanto que as obtidas pelas relações Z-R de Calheiros, Jones e Marshall-Palmer foram 512,63, 218,6 e 358,37 mm, respectivamente. Com esse estudo pudemos confirmar que ainda há muita dificuldade em se utilizar estimativas de chuva de radar meteorológico integrados a uma rede pluviométrica. Sugere-se realizar outros estudos semelhantes em escalas temporais diferentes.

**Palavras-chave:** Chuva; Drenagem; Pluviômetros

### Abstract

The aims of the present work were to validate the precipitation estimates of the meteorological radar of the Meteorological Center of Bauru (IPMet / UNESP) for the hydrographic basin of the Jacaré Guaçu River, located in the central region of the State of São Paulo / Brazil. For that, 2013 data from 18 pluviometric stations were used. Quantification of basin precipitation was performed using Thiessen polygons. For the validation of the radar, 3 Z-R relations were tested: Calheiros, Jones and Marshall-Palmer. The best validation results were obtained by Marshall-Palmer. To adjust the underestimated data from the weather radar, an optimization method was used in the data of the stations, finding the correction factor of 3.135. After the adjustment, a similarity was observed between the average precipitation observed by the rain gauges and the precipitation estimated by the radar. Without the necessary corrections, the rainfall accumulated in 2013 in the hydrographic basin according to the rain gauges was 1252.26 mm, while those obtained by the Z-R ratios of Calheiros, Jones and Marshall-Palmer were 512.63, 218.6 and 358.37 mm, respectively. With this study we were able to confirm that there is still a lot of difficulty in using rainfall estimates from weather radar integrated into a pluviometric network. It is suggested to carry out other similar studies on different time scales.

**Keywords:** Rainfall; Drainage; Rain gauges

## 1 Introdução

A falta de dados consistentes sobre o regime hidrológico das bacias e a complexidade dos respectivos sistemas meteorológicos atuantes são os principais problemas enfrentados durante a análise e avaliação da distribuição espacial e temporal da precipitação nas bacias hidrográficas (Zhang *et al.*, 2017). Dentro desse cenário, os modelos hidrológicos são fundamentais para o estudo de monitoramento de enchentes e análise do sistema de drenagem da bacia hidrográfica.

No entanto, a implementação de modelos hidrológicos gera a necessidade de dados espacializados da chuva (Emmanuel *et al.*, 2015). Esses dados podem ser obtidos por meio de técnicas tradicionais de espacialização dos dados pontuais de pluviômetros, dos dados de radar meteorológico, ou ainda pela combinação destas duas fontes de dados (Potdar *et al.*, 2019).

Os radares meteorológicos foram utilizados inicialmente para fins militares durante a Segunda Guerra Mundial e posteriormente para fins civis. Os dados provenientes de radar fornecem, em intervalos de poucos minutos, informações da precipitação de forma espacializada, com resolução espacial média de 1 km (Raghavan, 2013; Price *et al.*, 2014).

Esse instrumento é um sensor de micro-ondas ativo colocado em torres, plataformas aéreas ou espaciais que transmite pulsos de energia eletromagnética em intervalos de tempo regulares, concentrados em um feixe de pequena abertura através de uma antena rotativa. A fração da energia que retorna ao radar é medida pelo receptor e, conhecendo-se o intervalo de tempo entre a emissão e o retorno do eco, é possível estimar a distância do sistema convectivo e o volume da precipitação (Thorndahl *et al.*, 2017).

As medidas de precipitação com radar baseiam-se na quantidade de energia refletida pela chuva que retorna ao radar. A potência de retorno está diretamente relacionada com o espectro de gotas no volume iluminado pelo radar e, por isso, há necessidade do conhecimento sobre a sua distribuição (*drop-size distribution*) (Raghavan, 2013).

No âmbito da hidrologia, tem se utilizado dados de radar principalmente na aplicação de modelos hidrológicos. Diversos estudos implementaram modelos hidrológicos integrando dados de radar com a rede pluviométrica (Wilson & Brandes, 1979; Calheiros & Zawadzki, 1987; Cole & Moore, 2008; Fan & Collischonn, 2014; Cabral *et al.*, 2017; Potdar *et al.*, 2019).

A implementação de modelos hidrológicos chuva-vazão, por exemplo, necessita de dados distribuídos da chuva (Emmanuel *et al.*, 2015; Mishra *et al.*, 2018), que podem ser obtidos tanto com o uso de técnicas tradicionais de espacialização dos dados pontuais de pluviômetros, como dos dados de radar meteorológico, ou ainda pela combinação dessas duas fontes de dados.

O uso de estimativas de precipitação por radar meteorológico é uma importante ferramenta para o monitoramento e previsão hidrometeorológica e no auxílio ao gerenciamento e controle de enchentes. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é validar as estimativas de precipitação do radar meteorológico do Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMet/UNESP) com dados de chuva de uma rede pluviométrica para a bacia hidrográfica do Rio Jacaré Guaçu, localizada no centro do Estado de São Paulo – Brasil, dentro da área de cobertura do radar.

## 2 Material e Métodos

### 2.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende-se na Bacia Hidrográfica do Rio Jacaré Guaçu (Figura 1), localizada na região central do Estado de São Paulo, totalizando uma área de 1.820 km<sup>2</sup>. Essa bacia apresenta relatos de enchentes que ocorrem constantemente no período de cheia, afetando as cidades de Boa Esperança do Sul, Araraquara e São Carlos.

Segundo Mazzuco *et al.* (2017), a bacia do Rio Jacaré Guaçu constitui predominantemente um relevo plano, composto por colinas suavemente onduladas, oriundas do intemperismo químico e físico das formações geológicas existentes, neste caso, dos arenitos das formações Botucatu e Pirambóia.

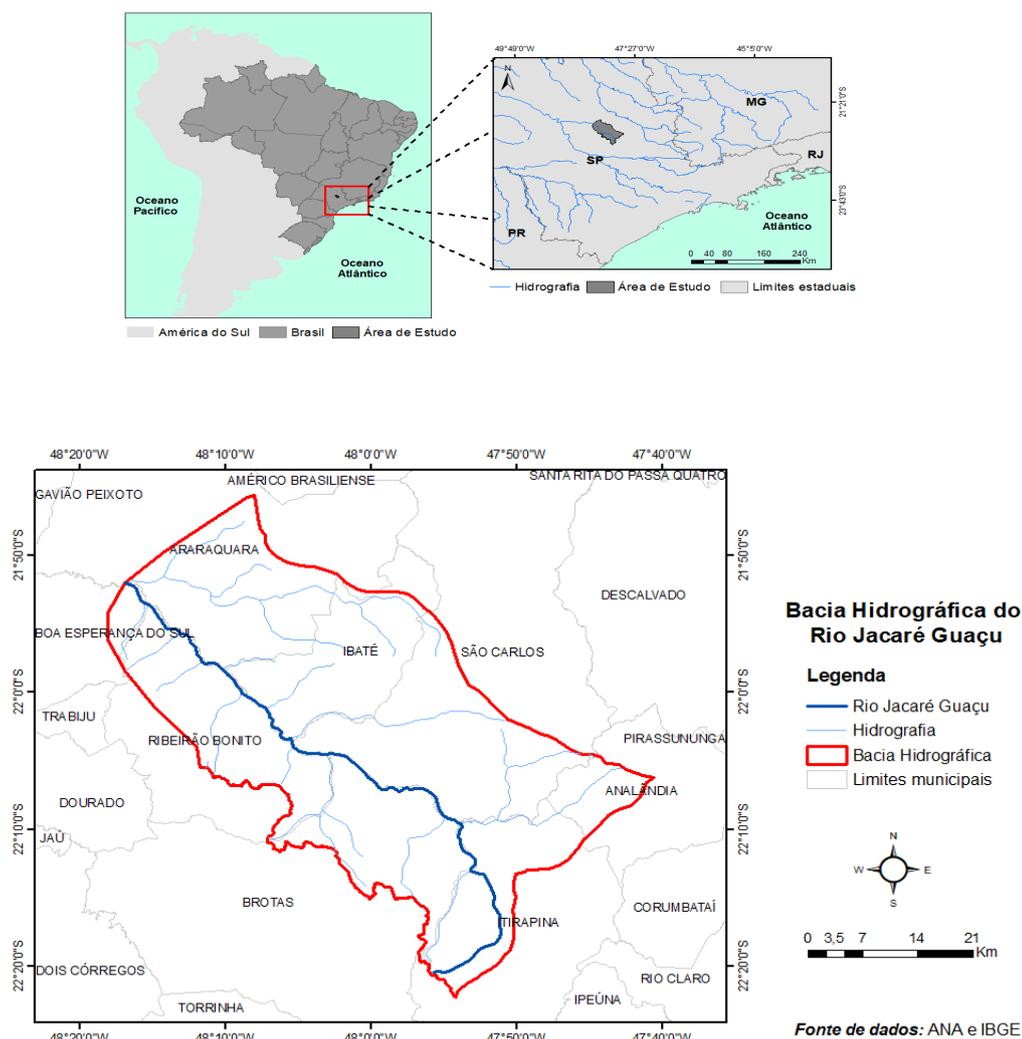


Figura 1 Mapa de localização da área de estudo na região sudeste do Brasil (parte superior), com a bacia hidrográfica destacada (parte inferior).

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região pode ser classificado como um clima tropical de altitude (Cwa), com verão úmido e inverno seco (Alvares *et al.*, 2013). A precipitação média anual é em torno de 1.400 mm, predominando nos meses mais quentes (CEPAGRI, 2019).

Nessa região do estado de São Paulo, no verão, os raios solares incidem quase que perpendicularmente devido à proximidade com o trópico de capricórnio. No verão também, ocorre a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), que traz umidade da região amazônica para outras regiões do Brasil. É importante destacar que esses sistemas causam aumento da precipitação sobre a região em que estão atuando e, à medida que o

inverno se aproxima, os sistemas atmosféricos enfraquecem e a chuva atinge o seu mínimo anual (Reboita *et al.*, 2012).

## 2.2 Dados Pluviométricos

Para este estudo de quantificação de chuva, foram considerados dois instrumentos: pluviômetros e radar meteorológico. A fonte de dados de radar foi o IPMet da Unesp de Bauru e, dos dados pluviométricos, a Agência Nacional de Águas (ANA) e o Departamento de Água e Energia Elétrica do Estado de São Paulo (DAEE). Foram identificadas e consideradas as estações existentes no raio de abrangência quantitativa do radar e da bacia do Jacaré-Guaçu (Figura 2).

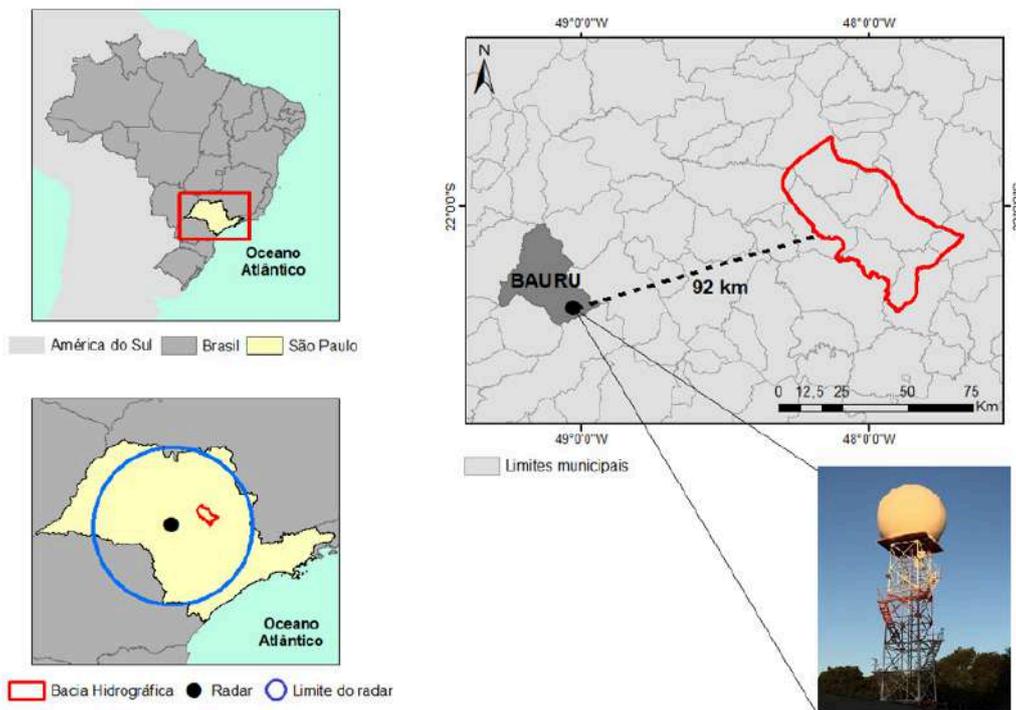


Figura 2 Representação da localização e da distância (em linha reta) entre o radar de Bauru e a bacia hidrográfica do rio Jacaré Guaçu.

No banco de dados da ANA e do DAEE, os dados pluviométricos disponíveis compreendem até o ano de 2015, entretanto, os dados utilizados nesse estudo abrangem o período de janeiro a dezembro de 2013. Esse período foi escolhido porque apresentou o maior número de estações operantes na área de estudo sem ocorrência de interrupção no registro de dados

Nesse trabalho, foram utilizados dados de 18 estações (Figura 3). Os pluviômetros utilizados pela ANA e DAEE são do tipo Ville de Paris, e todas as estações são convencionais, ou seja, os registros são lidos e anotados por um observador em um determinado intervalo. Estas estações são calibradas periodicamente de acordo com o manual técnico da ANA (ANA, 2014).

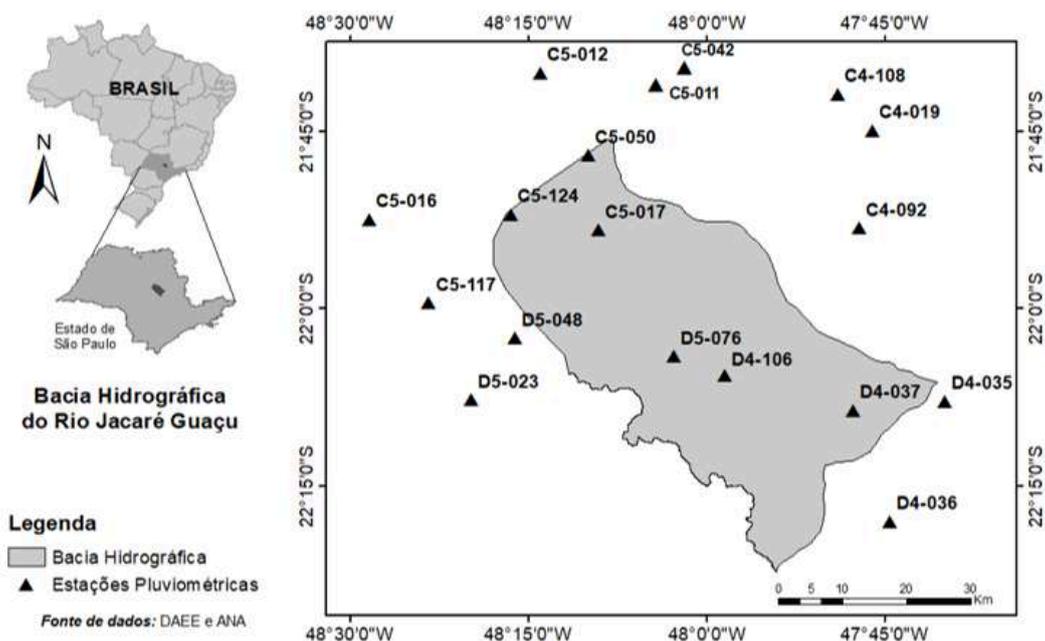


Figura 3 Mapa de localização das estações pluviométricas utilizadas neste estudo.

### 2.3 Seleção das estações pluviométricas através da Análise de Consistência Dupla Massa

Para a realização da análise de consistência dos dados de todas as estações pluviométricas, foi escolhido o método de dupla massa desenvolvido pelo *United States Geological Survey* (USGS, 2019). Qualquer mudança de tendência indica inconsistência que pode variar de acordo com o problema, sendo, neste caso, incorreta toda associação que se deseje fazer entre os dados dos postos inconsistentes e a região a qual pertencem (Thomas *et al.*, 2016). Nesse trabalho, a análise de dupla massa iniciando-se por aquelas que apresentaram menor coeficiente de correlação ( $r$ ) com as demais estações, de acordo com a Equação 1:

$$r = \frac{\sum_{l=1}^n (P_{i,l} - \bar{P}_i)(P_{j,l} - \bar{P}_j)}{\sqrt{(\sum_{l=1}^n (P_{i,l} - \bar{P}_i)^2) (\sum_{l=1}^n (P_{j,l} - \bar{P}_j)^2)}} \quad (1)$$

onde:  $P_{i,l}$  é a chuva observada [mm] pela estação pluviométrica  $i$  para o dia  $l$ ;  $P_{j,l}$  é a chuva observada [mm] pela estação pluviométrica  $j$  para o dia  $l$ ;  $\bar{P}_i$  é a média da chuva observada pela estação  $i$  [mm] para todos os dias analisados;  $\bar{P}_j$  é a média da chuva observada pela estação  $j$  [mm] para todos os dias analisados; e  $n$  é o número de dias analisados.

### 2.4 Estimativas de Chuva do Radar

#### Meteorológico

A partir do resultado de vários experimentos de estimativa de precipitação por radar, têm-se adotado uma relação empírica entre o fator de refletividade do radar ( $Z$ ) e a intensidade (ou taxa) de precipitação ( $R$ ). O fator de refletividade  $Z$  corresponde à quantidade e tamanho das gotas de água presentes no volume iluminado pelo radar e  $R$  representa um fluxo de chuva que atinge o solo (Raghavan, 2013). Esta relação, conhecida como  $Z$ - $R$  relação - é expressa pela Equação 2:

$$Z = aR^b \quad (2)$$

onde:  $Z$  é a refletividade [ $\text{mm}^6/\text{m}^3$ ];  $R$  é a taxa de precipitação [mm/h];  $a$  e  $b$  são constantes estimadas.

Os valores de  $a$  e  $b$  calculados de  $Z$ - $R$  variam significativamente, pois dependem da origem da

chuva, dos tipos das precipitações, das distribuições e dos tamanhos das gotas de chuva, da localização geográfica dos sistemas precipitantes e das condições meteorológicas.

Nesse estudo, os dados do radar meteorológico operado pelo IPMet foram fornecidos por meio do produto CAPPI (*Constante Altitude Plan Position Indicator*) com altura constante de 3,5 km (altura padrão), amostrados a cada 7,5 minutos, durante o período escolhido, ou seja, de janeiro a dezembro de 2013, sendo totalizados aproximadamente 60.000 arquivos de CAPPI. Os dados foram processados por um programa desenvolvido exclusivamente para o radar de Bauru. O programa possibilita extrair as informações dos arquivos CAPPI referentes à área de estudo e converter a refletividade da chuva [dBZ] dessa área para taxa de precipitação [mm/h] por meio da relação  $Z$ - $R$  escolhida.

Os dados foram integrados em períodos diários (24 horas) para coincidir com o acumulado de chuva registrado pelas estações convencionais (1 registro diário), gerando matrizes com resolução espacial de 1 km x 1 km. O programa flexibiliza a escolha do período a ser contabilizado pela escolha da data e horário de início e término do período de acumulação da chuva. O horário de acumulação da chuva com radar iniciou-se às 07:00h de modo a acompanhar o horário de medição dos pluviômetros convencionais.

Vale ressaltar que a comparação realizada nesse estudo está utilizando apenas os dias que apresentaram dados de radar completos, pois devido a manutenções que são realizadas periodicamente no instrumento, alguns dias não apresentaram leituras completas de arquivos CAPPI.

Para comparar as estimativas de chuva do radar com a chuva dos pluviômetros espacializada na bacia hidrográfica pelo método de Thiessen, foram testadas três relações  $Z$ - $R$ :

Equação de Jones:

$$Z = 486R^{1,37} \quad (3)$$

Equação de Marshall-Palmer:

$$Z = 200R^{1,6} \quad (4)$$

Equação de Calheiros:

$$Z=32R^{1,65} \quad (5)$$

onde:  $Z$  é a refletividade [ $\text{mm}^6/\text{m}^3$ ] e  $R$  é a taxa de precipitação [ $\text{mm}/\text{h}$ ].

Cada equação é comumente aplicada a um tipo específico de precipitação, entretanto, devido à dificuldade de se caracterizar o tipo de precipitação de cada evento, optou-se por aplicar as três relações para todo o período de dados analisado. A equação de Jones (1956) é aplicada em precipitações convectivas. Já a equação de Marshall-Palmer (1948) foi a primeira relação  $Z-R$  proposta, sendo a mais conhecida e utilizada entre os pesquisadores até hoje. Essa equação é aplicada geralmente para eventos estratiformes. A equação de Calheiros foi desenvolvida para ser utilizada exclusivamente para o radar de Bauru (Emidio, 2008; Emidio & Landim, 2008) incorporando o efeito da distância dos sistemas convectivos ao radar, entre outras características próprias do radar do IPMet (Calheiros & Zawadzki, 1987).

## 2.5 Comparação das estimativas de chuva das estações pluviométricas e do radar

A comparação das estimativas de chuva das estações com o radar foi realizada por meio da quantificação da chuva média representativa para a bacia, de acordo com a distribuição dos polígonos de Thiessen (Thiessen, 1911). Este método gera uma média ponderada das alturas registradas pelos pluviômetros que é diretamente proporcional à área de influência da bacia. São consideradas as estações inseridas na área, bem como estações localizadas na região de entorno e que exercem influência na área delimitada da bacia.

O método apresenta bons resultados em terrenos levemente acidentados quando a localização e exposição dos pluviômetros são semelhantes e as distâncias entre eles não são muito grandes (Marciano *et al.*, 2018). A precipitação média na bacia é calculada pela Equação 6:

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i P_i}{A} \quad (6)$$

em que  $\bar{P}$  é a precipitação média na bacia [ $\text{mm}$ ];  $P_i$

é a precipitação na estação  $i$  [ $\text{mm}$ ];  $A_i$  é a área de influência da estação  $i$  dada pela área do respectivo polígono, dentro da bacia [ $\text{km}^2$ ] e  $A$  é a área total da bacia [ $\text{km}^2$ ].

Para a quantificação da chuva estimada pelo radar, foi calculado a média dos pixels da grade gerada pelo radar para as mesmas áreas dos polígonos de Thiessen na bacia. Desta forma, comparou-se a média dos pixels separadamente em cada polígono com o valor da precipitação correspondente ao mesmo polígono. Este método foi utilizado porque os pluviômetros medem ou registram a chuva de forma pontual e o radar meteorológico estima a chuva de forma espacial. Sendo assim, a média é a maneira mais simples de suavizar as variações de cada instrumento. Nesse trabalho, os polígonos de Thiessen foram gerados no software ArcGis 10.2.

## 2.6 Escolha da Relação Z-R

Nesse trabalho, a escolha da melhor relação  $Z-R$  foi realizada com base nas seguintes métricas: coeficiente de determinação ( $r^2$ ), desvio padrão ( $S$ ), Raiz do Erro Quadrático Médio ( $REQM$ ) e *bias*. O  $r^2$  é utilizado para medir a concordância entre a chuva observada pelas estações e a chuva estimada pelo radar, sem levar em conta a magnitude do erro. Já o  $REQM$  representa o erro total em  $\text{mm}$ , independentemente da direção do erro. Entretanto, o  $REQM$  pode ser influenciado pelo  $S$ , pois um  $S$  maior implica em um maior  $REQM$  independente do sinal do erro associado (sub ou super estimado). O *bias* representa a direção em que o radar erra; se for negativo o radar subestima a chuva, já se for positivo o radar superestima a chuva (Rabiei & Haberlandt, 2015).

$$r^2 = \frac{(\sum_{l=1}^n (P_{o,l} - \bar{P}_o) P_{e,l})^2}{\sum_{l=1}^n (P_{o,l} - \bar{P}_o)^2 \sum_{l=1}^n (P_{e,l} - \bar{P}_e)^2} \quad (7)$$

$$S = \sum_{l=1}^n \sqrt{\frac{(P_{o,l} - \bar{P}_o)^2}{(n-1)}} \quad (8)$$

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{l=1}^n (P_{e,l} - P_{o,l})^2} \quad (9)$$

$$bias = \frac{\sum_{l=1}^n (P_{e,l} - P_{o,l})}{\sum_{l=1}^n (P_{o,l})} \quad (10)$$

onde:  $P_{o,l}$  é a chuva observada [mm] pelas estações pluviométricas para o dia  $l$ ;  $P_{e,l}$  é a chuva estimada [mm] pelo radar meteorológico para o dia  $l$ ;  $\bar{P}_o$  é a média da chuva observada [mm] para todos os dias analisados;  $\bar{P}_e$  é a média da chuva estimada [mm] para todos os dias analisados; e  $n$  é o número de dias analisados (eventos).

## 2.7 Correção das estimativas de chuva do radar

Após a escolha da relação  $Z-R$  que melhor representou a quantificação da precipitação, a correção das estimativas de chuva do radar foi realizada de acordo com o fator de correção dado pelo coeficiente de regressão linear ou de determinação ( $r^2$ ) obtido entre a chuva estimada pelo radar meteorológico e a chuva observada pelos pluviômetros. Essa correção é necessária visto que, deve-se minimizar as distorções ocasionadas pela alteração das informações entre esses dois instrumentos, que podem ocasionar uma super ou subestimação da precipitação (Wilson & Brandes, 1979; Calheiros & Zawadzki, 1987; Pereira Filho, 1998; Antonio & Andrade, 2007; Price *et al.*, 2014; Kirtsaeng & Chantraket, 2017).

Para isso, foi necessário aplicar um método alternativo de interpolação das precipitações observadas nas estações para encontrar a precipitação mais representativa da bacia, de modo que as observações de cada pluviômetro fossem ponderadas pela área ao seu redor, delimitada por polígonos de Thiessen. Este método, assim como outros métodos de interpolação, fornece bons resultados apenas em terrenos levemente acidentados, quando a localização e exposição entre os postos pluviométricos são semelhantes (Bartoletti *et al.*, 2018).

Nesse estudo, além dos polígonos de Thiessen, foi utilizado o algoritmo de otimização *Broyden Fletcher Goldfarb Shanno* (BFGS) para estimar os pesos de cada estação na definição da chuva representativa para a bacia por meio da minimização dos erros quadráticos das estações pluviométricas (Kou & Dai, 2015). Dessa forma, a área não interfere no peso das estações conforme a

Equação 11:

$$\bar{P} = \sum_{i=1}^n K_i P_i \quad (11)$$

em que  $\bar{P}$  é a precipitação média na bacia [mm];  $P_i$  é a precipitação na estação  $i$  [mm] e  $K_i$  é o peso de influência da estação  $i$ .

O algoritmo de otimização BFGS é um método iterativo para resolver problemas de otimização não-linear sem restrições, através da técnica de mínimos quadrados (Kou & Dai, 2015). Foram realizadas duas seleções, iniciando pelo conjunto das 18 estações e excluindo sucessivamente as estações que apresentaram os menores pesos. Os pesos das estações foram otimizados até que o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) entre as estações e o radar indicasse um melhor ajuste. Em seguida, a precipitação estimada pelo radar foi multiplicada pelo fator de correção gerado pelo conjunto de estações selecionadas na otimização.

## 3. Resultados e Discussão

### 3.1 Análise dos Dados Pluviométricos

Para a análise dos dados pluviométricos, primeiramente foi feita uma matriz de correlação entre as 18 estações. A matriz de correlação possibilitou a análise simultânea da coerência entre as estações, identificando visualmente as estações que mais apresentaram concordância entre si.

A análise de consistência através do método de dupla massa foi realizada para todas as 18 estações. Entretanto, para a composição dos polígonos de Thiessen, foram utilizados dados de apenas 9 estações que apresentaram as melhores análises de consistência. Sendo assim, as outras 9 foram descartadas.

Dentre as estações utilizadas para a composição dos polígonos de Thiessen, apenas a estação D5-076 apresentou discreta mudança na declividade da reta. Esse problema está relacionado à ocorrência de erros sistemáticos devido à mudança nas condições de observação ou no meio físico (Thomas *et al.*, 2016). A Figura 4 apresenta as áreas de influência de cada posto pluviométrico, em relação à distribuição espacial da chuva segundo o método de Thiessen.

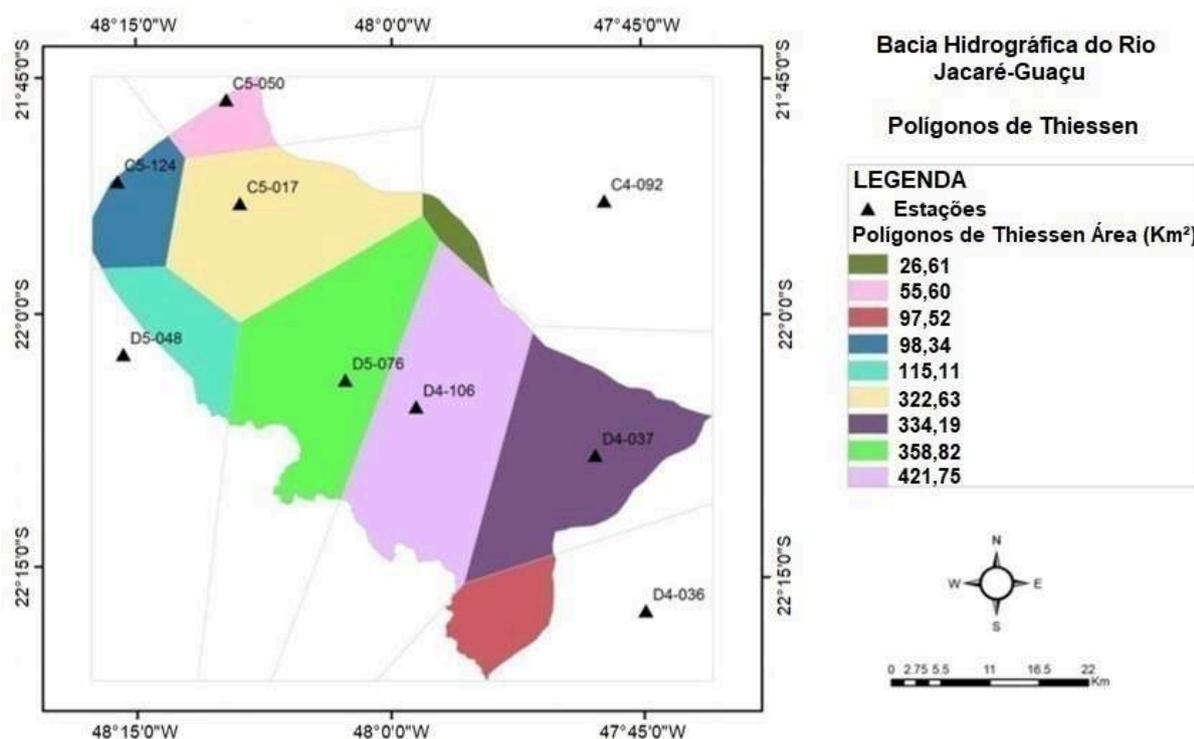


Figura 4 Representação da distribuição espacial das estações e suas respectivas áreas ponderadoras definidas pelos polígonos traçados segundo o Método de Thiessen.

A distribuição não uniforme e a ausência de postos pluviométricos mais próximos fizeram com que determinados polígonos apresentassem áreas de influência muito maiores e com maior peso na contabilidade da área total de cada estação. Para a bacia do Rio Jacaré-Guaçu, observou-se que a distribuição espacial das precipitações é mais regular nas áreas menos elevadas e mais planas, pois o relevo do terreno exerce pouca influência na intensificação das chuvas nesses locais. Nos locais de relevo mais irregular, percebeu-se a existência de maiores amplitudes nos totais pluviométricos, havendo uma coincidência entre as altitudes menos elevadas e as menores pluviometrias (Silva *et al.*, 2015).

Embora esse método leve em conta a desuniformidade na distribuição espacial dos postos pluviométricos, pode ser inviabilizado em algumas situações por não considerar a influência do relevo (Bartoletti *et al.*, 2018).

### 3.2 Validação das Estimativas de Chuva do Radar Meteorológico

Para a validação das estimativas de chuva do radar meteorológico, foi calculado a média da precipitação estimada pelo radar de acordo com a grade da distribuição dos polígonos de Thiessen.

A Tabela 1 apresenta os valores encontrados das métricas de validação do radar para cada relação Z-R.

Relações Z-R	$r^2$ [%]	$S$ [mm]	$bias$ [mm]	$REQM$ [mm]
Calheiros	79,14	2,41	3,25	23,80
Jones	78,04	4,27	-0,26	25,06
Marshall-Palmer	79,46	3,77	-0,16	23,44

Tabela 1 Estatísticas de validação dos dados obtidos com o radar meteorológico em relação aos dados de chuvas observadas com pluviômetros.

Os coeficientes de determinação encontrados foram muito próximos, sendo que a relação de Marshall-Palmer apresentou o maior  $r^2$  (79,46%). O

desvio padrão variou entre 4,27 mm (Jones) e 2,41 mm (Calheiros). Já o  $REQM$  variou em torno de 23,44 mm (Marshall-Palmer) e 25,06 mm (Jones). Por fim,

o *bias* apresentou valor positivo para a relação de Calheiros, o que significa superestimativa da chuva estimada pelo radar, corroborando o relatado por Emidio (2008). Ambas as relações Marshall-Palmer e Jones apresentaram valores negativos, implicando em ligeira subestimativa da chuva estimada pelo radar (-16 e -0,26, respectivamente).

Pelos resultados obtidos, verificou-se que as relações de Jones e Marshall-Palmer estavam subestimando a chuva média em dias chuvosos, enquanto a relação de Calheiros superestimou a chuva média em dias secos. A equação de Jones

(1956) apresentou a maior subestimação, resultado esse esperado, pois essa equação apresenta bom desempenho apenas para precipitações convectivas.

Dessa forma, foi realizada outra validação, utilizando as mesmas métricas, mas descartando dias que apresentaram maior volume de chuva da série de dados, para que esses dias não influenciassem na tendência de subestimação dessas relações em dias chuvosos. Quatro dias da série de dados que apresentaram o maior volume de chuva (*outliers*) em 2013 foram descartados (Figura 5).

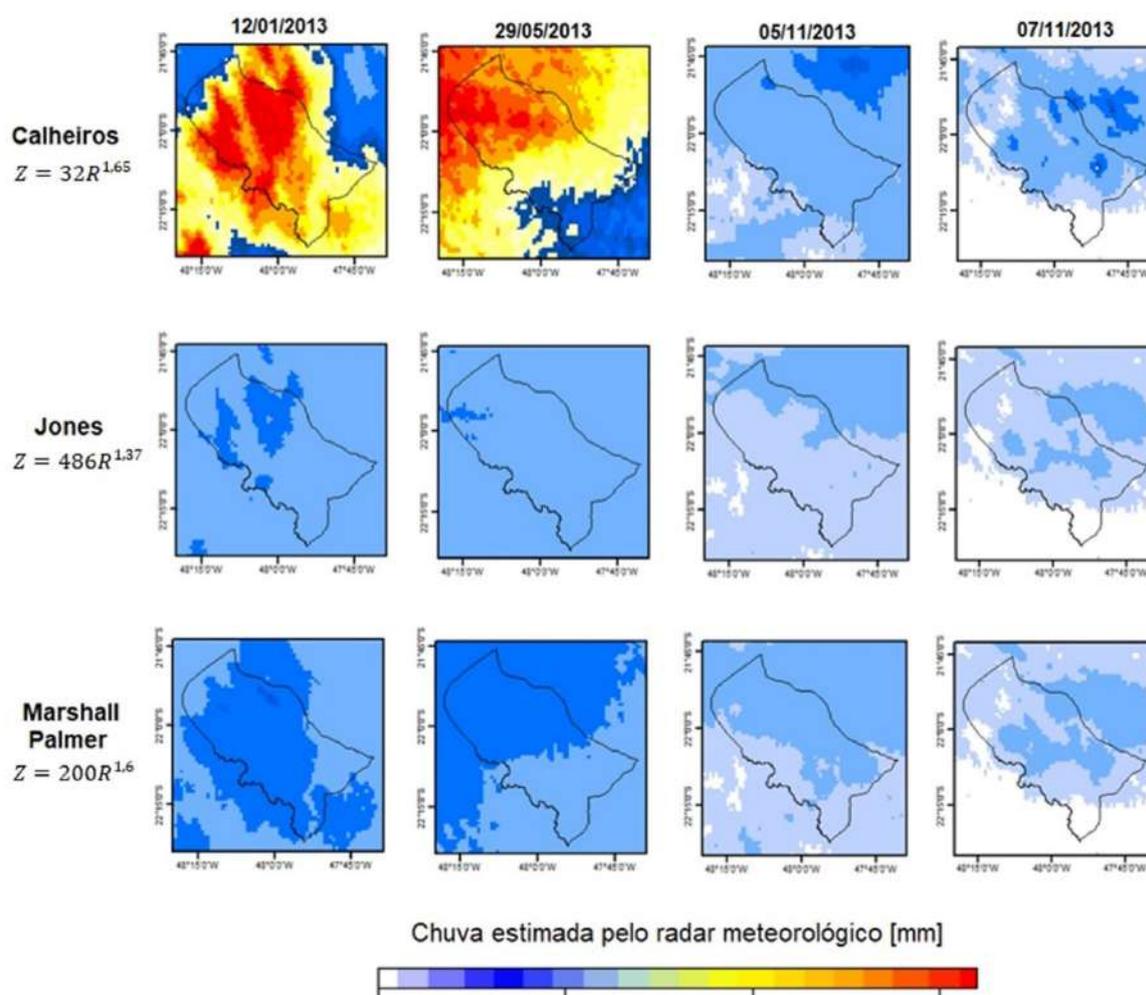


Figura 5 Dias que apresentaram o maior volume de chuva média [mm] estimada pelo radar meteorológico no período analisado.

Após a retirada desses dias da série de dados, as métricas de validação foram recalculadas (Tabela 2).

Relações Z-R	$r^2$ [%]	$S$ [mm]	<i>bias</i> [mm]	<i>REQM</i> [mm]
Calheiros	78,52	2,07	3,33	9,26
Jones	76,35	3,41	-0,14	10,20
Marshall-Palmer	79,49	2,98	-0,08	8,84

Tabela 2 Estatísticas de validação dos dados obtidos com o radar meteorológico em relação aos dados de chuvas observadas com pluviômetros, com a remoção dos *ouliers*.

Os coeficientes de determinação encontrados na segunda validação apresentaram quase o mesmo valor da validação anterior, sendo que novamente a relação de Marshall-Palmer apresentou o maior  $r^2$  (79,49%). O desvio padrão diminuiu, variando entre 3,41 mm (Jones) e 2,07 mm (Calheiros). Já o *REQM* foi o parâmetro que obteve o maior declínio, variando em torno de 8,84 mm (Marshall-Palmer) e 10,20 mm (Jones). O *bias*, novamente, apresentou valor de superestimativa para a relação de Calheiros (3,33 mm) e valores negativos (subestimativa) para as relações de Jones e Marshall-Palmer, de 0,14 mm e 0,08 mm respectivamente.

Os resultados encontrados ao utilizar a relação de Calheiros foram divergentes das outras duas relações, estas menos divergentes entre si. Além disso, não reproduziram verdadeiramente o volume precipitado sobre a rede pluviométrica, apresentando desvios de significativa magnitude quando comparados aos totais da chuva quantificada pelo método de Thiessen. Apesar da subestimação, a equação de Marshall Palmer foi a relação que apresentou o maior  $r^2$  entre as três equações testadas. É possível notar na Figura 6 a discrepância dos valores de maior magnitude. Isso pode ter relação com a precipitação observada pelo método de Thiessen.

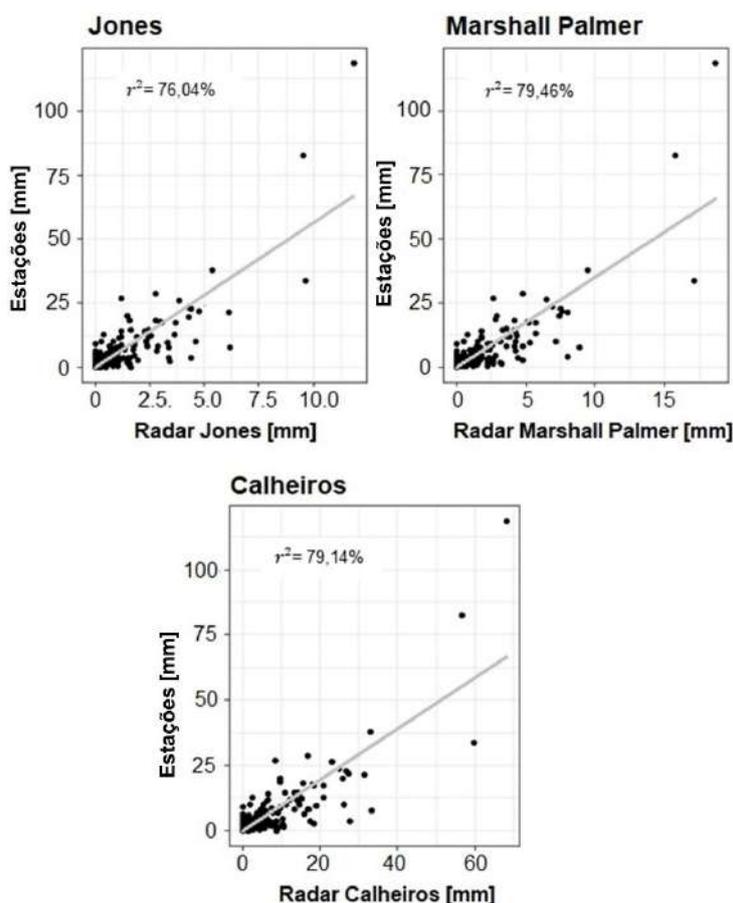


Figura 6 Gráficos de dispersão entre a chuvas diárias estimadas pelo radar meteorológico com as relações Z-R e as chuvas diárias estimadas pelo Método de Thiessen utilizando as precipitações observadas nas estações pluviométricas.

Alguns estudos utilizaram a clássica relação Z-R de Marshall Palmer e reafirmaram a necessidade de se realizar um ajuste nas estimativas de chuva. Antonio & Andrade (2007) apresentaram três eventos de inundação na bacia urbana do

córrego Gregório, em São Carlos-SP e avaliaram a eficácia do radar meteorológico de Bauru no monitoramento e quantificação da precipitação de São Carlos com os dados pluviométricos de uma estação da área. O uso da relação Z-R de Marshall

Palmer para quantificação da chuva estimada pelo radar levou a uma subestimativa significativa dos totais precipitados, com diferenças atingindo mais de 81%. Com isso, os autores reafirmam a necessidade de se aplicar um fator de correção nas estimativas.

Devido aos melhores resultados da validação serem obtidos pela chuva estimada pela equação de Marshall-Palmer, o ajuste das estimativas de chuva do radar foi realizado com base nessa relação *Z-R*.

### 3.3 Correção das Estimativas de Chuva do Radar Meteorológico

Para a correção das estimativas de chuva do radar meteorológico, foram utilizadas 2 seleções, sempre eliminando as estações que apresentassem pesos menores de acordo com o algoritmo de otimização *BFGS*, até chegar ao melhor ajuste do coeficiente de determinação ( $r^2$ ). Os resultados destas seleções estão apresentados na Tabela 3.

Estações	Primeira seleção	Segunda seleção	Thiessen
C4-019	-	-	-
C4-092	0,0494	-	0,0145
C4-108	-	-	-
C5-011	0,1213	0,1264	-
C5-012	0,0183	-	-
C5-016	-	-	-
C5-017	0,1278	0,1349	0,1762
C5-042	-	-	-
C5-050	0,1660	0,1745	0,0303
C5-117	0,0657	0,0844	-
C5-124	0,0732	0,1016	0,0537
D4-035	0,1168	0,1389	-
D4-036	0,0438	-	0,0532
D4-037	0,0448	0,0534	0,1825
D4-106	0,0655	0,0703	0,2406
D5-023	-	-	-
D5-048	-	-	0,0628
D5-076	0,1069	0,1152	0,1960

Tabela 3 Comparação dos pesos das estações, de acordo com o algoritmo de otimização *BFGS*, com os pesos atribuídos a elas pelo método dos polígonos de Thiessen.

As estações C4-092, D4-036 e D5-048 que foram selecionadas previamente no método dos polígonos de Thiessen, não foram selecionadas no método de mínimos quadrados na 2ª seleção. Em seus lugares foram selecionadas as estações C5-011, C5-117 e D4-035.

Além disso é possível notar a diferença de pesos impostos por *BFGS* em relação a Thiessen, principalmente quanto às estações D4-037 e D4-106 que apresentaram um peso elevado no método de Thiessen, por conta da área atribuída a esta estação,

(Figura 4), em contraste com os pesos atribuídos a elas pelo método alternativo *BFGS* de interpolação.

O fator de correção foi calculado de acordo com o ajuste obtido em cada seleção (Figura 7). Os valores de coeficiente de correção e de  $r^2$  para cada seleção foram:

- 1ª seleção: Fator de correção= 3,123 e  $r^2=89,8\%$   
- 12 estações selecionadas;
- 2ª seleção: Fator de correção= 3,135 e  $r^2=89,4\%$   
- 9 estações selecionadas.

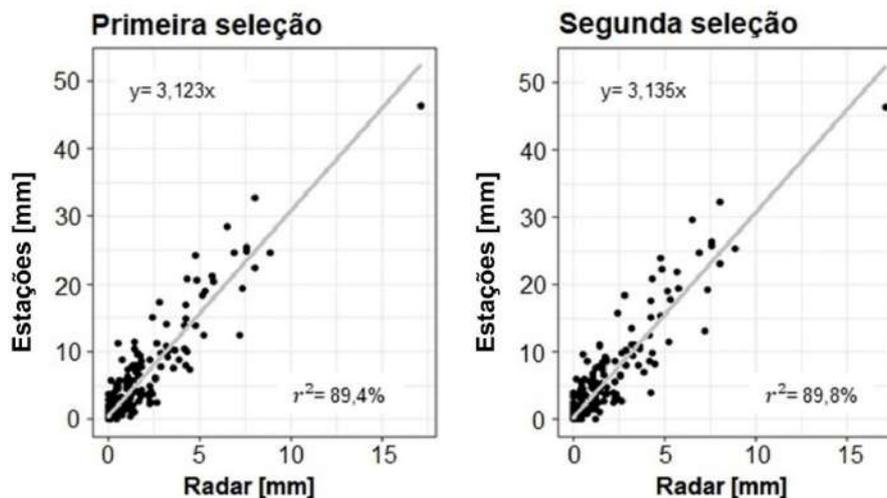


Figura 7 Gráficos de dispersão dos valores acumulados de chuva das estações selecionadas pelo método BFGS.

Após o ajuste com o fator de correção, observou-se uma maior semelhança entre a média mensal da precipitação observada pelos pluviômetros selecionados no método de otimização e a precipitação estimada pelo radar (Figura 8). É importante ressaltar

que essa comparação está utilizando apenas os dias que apresentaram dados de radar completos, portanto, essas médias não representam a real média diária mensal da precipitação para a bacia durante o ano de 2013.

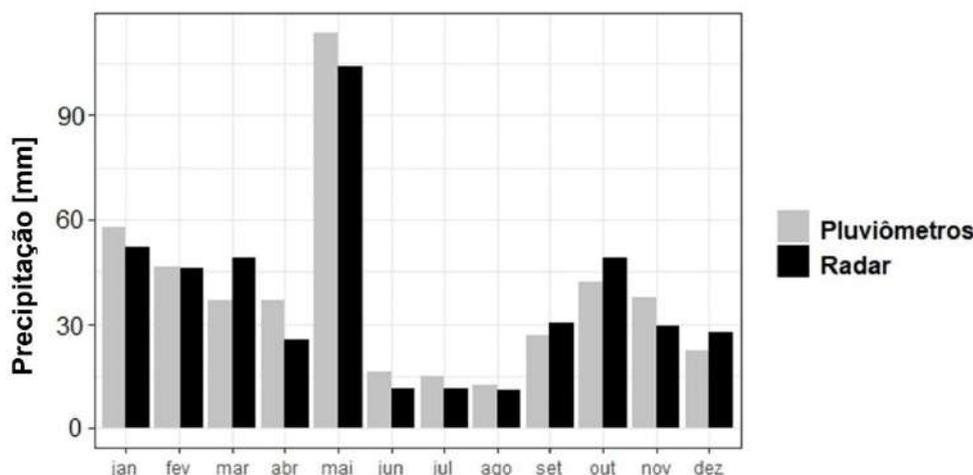


Figura 8 Comparação da precipitação média mensal estimada pelo radar após a calibração, utilizando os coeficientes obtidos pelo método BFGS, com a precipitação observada pelos pluviômetros. Período: ano de 2013.

De acordo com a Figura 8, a precipitação total estimada pelos pluviômetros foi de 539 mm, enquanto que para o radar, após a calibração, foi de 493 mm. Os valores foram muito próximos, variando em poucos milímetros os acumulados mensais registrados por ambos os instrumentos. Kaiser (2006) também avaliou métodos de composição de campos de precipitação na bacia do Rio Jacaré Guaçu utilizando dados de pluviômetros e do radar meteorológico do IPMet de Bauru, em eventos ocorridos entre os anos de 1993 a 1998. Para a calibração, o autor escolheu os dados do ano de 1995, levando-o a optar pela equação de Marshall-Palmer para o cálculo dos campos

de precipitação. Neste caso, o fator de correção encontrado para as estimativas de chuva foi de 2,47 e um desvio padrão de 3,35 mm. Deste modo, os resultados aqui apresentados ficaram próximos ao fator de correção encontrado em Kaiser (2006).

Já no estudo de Morales & Amorim (2016) foram apresentados procedimentos para a integração de uma rede de 3 radares meteorológicos do interior do estado de São Paulo que podem ser aplicados em outras redes. Para isso, os autores calibraram os radares a partir da comparação entre os dados dos radares de superfície com medidas coincidentes do radar meteorológico a bordo do *Tropical Rainfall*

*Measuring Mission* (TRMM). Para a integração dos radares meteorológicos foi utilizado um método que utiliza os planos indicadores de posição a altitude constante (CAPPIs) e um outro, que utiliza os dados volumétricos projetados em um espaço tridimensional. A partir de uma análise com os dados do radar meteorológico do TRMM foi possível constatar que os 3 radares meteorológicos do estado de São Paulo apresentavam um bias, sendo que os radares meteorológicos de Salesópolis e Presidente Prudente superestimam o fator refletividade do radar em +6,0 e 4,4 dBZ respectivamente, enquanto que o radar de Bauru apresentou uma subestimativa de -4,3 dBZ. Neste sentido, os resultados aqui apresentados para os dados do radar de Bauru foram opostos aos apresentados por Morales & Amorim (2016), pois superestimaram a precipitação de superfície.

Anagnostou *et al.* (1999) utilizaram dados do TRMM *Precipitation Radar* (PR) para a validação das informações adquiridas pelo radar de superfície de Bauru, operado pelo IPMET. Observou-se que o radar é mais sensível que o TRMM-PR a pixels com valores menores que 17 dBZ. Segundo o autor, isto ocorre pelo fato de o PR ter um limiar de sensibilidade de aproximadamente 17 dBZ. Tal fato implica em subestimativa da precipitação estimada pelo TRMM-PR em relação à estimada pelo radar do IPMET de Bauru.

Nos procedimentos de correção das estimativas de radar, em geral, utilizam-se dados de postos pluviométricos como verdade terrestre, entretanto, um sério problema é criado, pois dados de radar e de pluviômetros são medidos em escalas diferentes: um mede a precipitação em um ponto e outro fornece as precipitações médias em áreas representadas pelo elemento de resolução da grade. Além disso, os pluviômetros fazem medições das precipitações no solo e o radar nas nuvens, e não há garantia que a quantidade de precipitação medida em uma nuvem caíra exatamente no ponto do solo de mesmas coordenadas que esta nuvem. Para isso, basta apenas considerar a existência de vento no momento da tempestade (Raghavan, 2013; Hamidi *et al.*, 2017).

Nesse estudo, apenas a escala diária foi estudada, pois a bacia não apresenta estações automáticas em seu limite, o que poderia contribuir para um estudo mais refinado, utilizando uma escala de tempo menor de precipitação acumulada.

## 4 Conclusões

Com esse estudo foi possível confirmar que ainda há muita dificuldade em se utilizar estimativas de chuva de radar meteorológico, pois o radar não mede diretamente a precipitação, e sim o espectro das gotas de chuva.

O método de otimização por mínimos quadrados, BFGS, utilizado para selecionar as estações com maiores pesos foi satisfatório ao diagnosticar a chuva mais representativa para a bacia sem a interferência da área de abrangência da estação pluviométrica como no método dos Polígonos de Thiessen, o que produziu resultados mais consistentes de comparação entre a precipitação observada pelos pluviômetros com as estimativas feitas pelo radar.

Após a correção, a precipitação observada pelos pluviômetros foi semelhante com as estimativas do radar, porém, é preciso ressaltar que os pluviômetros são instrumentos que medem as chuvas pontuais, sendo assim há a possibilidade de haver incertezas significativas no entendimento dos diferentes processos relativos aos mecanismos dinâmicos da precipitação e de sua variabilidade espaço-temporal. Propõe-se testar o método dos mínimos quadrados em outras escalas temporais e horizontais a fim de saber qual é a resolução mais adequada. Além disso, é preciso comparar o método com metodologias de correção apresentadas em outros estudos como os descritos em Antonio & Andrade (2007) e Price *et al.* (2014).

Houve subestimativa da precipitação utilizando a relação - de Marshall-Palmer e Jones e superestimativa pela relação de Calheiros, como esperado. Porém, a integração com os dados pluviométricos convergiu para a intensidade da chuva registrada na rede pluviométrica após a aplicação do fator de correção. Desta forma, acredita-se que o campo resultante da integração proporcionada pelo radar é mais realístico que medições e estimativas obtidas por cada pluviômetro isoladamente. Embora sensores remotos ainda não possuam uma boa acurácia na determinação do valor acumulado de chuva tal como o pluviômetro, eles garantem uma altíssima resolução espacial, nesse caso de 1 km x 1 km.

O uso de estimativas de precipitação por radar meteorológico é uma importante ferramenta para o monitoramento e previsão hidrometeorológica e no

auxílio ao gerenciamento e controle de enchentes. Sem as devidas correções, a chuva acumulada em 2013 na bacia hidrográfica de acordo com os pluviômetros foi de 1252,26 mm, enquanto que as obtidas pelas relações Z-R de Calheiros, Jones e Marshall-Palmer foram 512,63, 218,6 e 358,37 mm, respectivamente. Portanto, a dificuldade ainda está em adequar uma relação Z-R na convergência dos valores estimados de precipitação pelos radares em taxas de precipitação que equivalham às observadas pelos pluviômetros, o que justifica a continuidade de pesquisas e investigações como a apresentada neste trabalho.

## 5 Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES). Os autores agradecem ao IPMet/UNESP-Bauru pelo fornecimento dos dados de radar e à ANA e DAEE pelo fornecimento dos dados pluviométricos.

## 6 Referências

- ANA. 2014. Agência Nacional de Águas. Medição de descarga líquida em grandes rios: Manual Técnico. 2 ed. Brasília, DF: ANA - Superintendência de Gestão da Rede Hidrometeorológica, 94p.
- Alvares, C.A.; Stape, J.L.; Sentelhas, P.C.; Moraes, G.; Leonardo, J. & Sparovek, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6): 711-728.
- Anagnostou, E.N.; Krajewski, W.F. & Smith, J. 1999. Uncertainty quantification of mean-areal radar-rainfall estimates. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 16(2): 206-215.
- Antonio, M.A. & Andrade, J.P.M. 2007. Inundações em São Carlos, SP: Avaliação de chuvas com radar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, Florianópolis, Resumos, p. 3255-3262.
- Bartoletti, N.; Casagli, F.; Marsili-Libelli, S.; Nardi, A. & Palandri, L. 2018. Data-driven rainfall/runoff modelling based on a neuro-fuzzy inference system. *Environmental Modelling & Software*, 106: 35-47.
- Cabral, S.L.; Sakuragi, J. & Silveira, C.D.S. 2017. Incertezas e erros na estimativa de vazões usando modelagem hidrológica e precipitação por RADAR. *Revista Ambiente & Água*, 12(1): 57-70.
- Calheiros, R.V. & Zawadzki, I. 1987. Reflectivity rain rate relationships for radar hydrology in Brazil. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 26: 118-132.
- CEPAGRI. 2019. Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas a Agricultura. Disponível em: <<http://www.cepagri.unicamp.br/>>. Acesso em: 28 out. 2019.
- Cole, S.J. & Moore, R.J. 2008. Hydrological modelling using rain gauge and radarbased estimators of areal rainfall. *Journal of Hydrology*, 358(3-4), 159-181.
- Emidio, Z.P.D.O. 2008. *Impacto do balanço hídrico em diferentes tipos de solos: comparação entre dados de radar-pluviômetro e análise de tendência da chuva em área agrícola*. 2008. Programa de Pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Rio Claro. Tese de Doutorado, 147p.
- Emidio, Z.P.D.O. & Landim, P.M.B. 2008. Análise de superfície de tendência aplicada à chuva, medida por radar meteorológico, nas regiões de Assis e Piracicaba, SP. *Geociências*, 27(4): 439-449.
- Emmanuel, I.; Andrieu, H.; Leblais, E.; Janey, N. & Payrastré, O. 2015. Influence of rainfall spatial variability on rainfall-runoff modeling: Benefit of a simulation approach. *Journal of Hydrology*, 531: 337-348.
- Fan, F.M. & Collischonn, W. 2014. Integração do modelo MGB-IPH com sistema de informação geográfica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 19(1): 243-254.
- Hamidi, A.; Devineni, N.; Booth, J.F.; Hosten, A.; Ferraro, R.R. & Khanbilvardi, R. 2017. Classifying urban rainfall extremes using weather radar data: An application to the greater New York area. *Journal of Hydrometeorology*, 18(3): 611-623.
- Jones, D.M.A. 1956. *Rainfall drop-size distribution and radar reflectivity*. Urban Meteorology Laboratory: State Water Survey, Illinois, 20p.
- Kaiser, I.M. 2006. *Avaliação de métodos de composição de campos de precipitação para uso em modelos hidrológicos distribuídos*. 2006. Programa de Pós-graduação em Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos. Tese de Doutorado, 400p.
- Kirtsang, S. & Chantraket, P. 2017. Investigation of ZR Relationships for Monsoon Seasons over Southern Thailand. *Applied Mechanics and Materials*, 855: 159-164.
- Kou, C.X. & Dai, Y.H. 2015. A modified self-scaling memoryless Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno method for unconstrained optimization. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 165(1): 209-224.
- Marciano, A.G.; Barbosa, A.A. & Silva, A.P.M. 2018. Cálculo de precipitação média utilizando método de Thiessen e as linhas de cumeada. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 13(1): 1-9.
- Marshall, J.S. & Palmer, W.M.K. 1948. The distribution of rain-

- drops with size. *Journal of meteorology*, 5(4), 165-166.
- Mazzuco, G.G.; Gonçalves, M.P.; Miguel, B.H.; Villa, M.F.; Costa, C.W. & Moschini, L.E. 2017. Indicadores de Naturalidade da Paisagem Aplicados no Monitoramento da Qualidade Ambiental de Mananciais. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 10(5): 1406-1418.
- Mishra, V.; Shah, R.; Azhar, S.; Shah, H.; Modi, P. & Kumar, R. 2018. Reconstruction of droughts in India using multiple land-surface models (1951–2015). *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(4): 2269-2284.
- Morales, C.A. & Amorim, W.C. 2016. Metodologia para integração de uma rede de radares meteorológicos: aplicação para o estado de São Paulo. *Ciência e Natura*, 38(2): 1036-1053.
- Pereira Filho, A.J.; Crawford, K.C. & Hartzell, C.L. 1998. Improving WSR-88D hourly rainfall estimates. *Weather and Forecasting*, 13(4): 1016-1028.
- Potdar, S.S.; Kulkarni, S.; Patil, P.; Pawar, R.P.; Jakhalekar, V.V. & Nade, D.P. 2019. The long-term trend analysis of rainfall data from 1901 to 2015 for Maharashtra and Goa region from India. *International Journal of Water*, 13(3): 293-309.
- Price, K.; Purucker, S.T.; Kraemer, S.R.; Babendreier, J.E. & Knightes, C.D. 2014. Comparison of radar and gauge precipitation data in watershed models across varying spatial and temporal scales. *Hydrological Processes*, 28(9): 3505-3520.
- Rabiei, E. & Haberlandt, U. 2015. Applying bias correction for merging rain gauge and radar data. *Journal of Hydrology*, 522: 544-557.
- Raghavan, S. 2013. *Radar meteorology*. Springer Science & Business Media, 466p.
- Reboita, M.S.; Kruche, N.; Ambrizzi, T. & Rocha, R.P. 2012. Entendendo o Tempo e o Clima na América do Sul. *Terra & Didática*, 8: 34-50.
- Silva, R.M.; Santos, C.A.; Moreira, M.; Corte-Real, J.; Silva, V.C. & Medeiros, I.C. 2015. Rainfall and river flow trends using Mann–Kendall and Sen’s slope estimator statistical tests in the Cobres River basin. *Natural Hazards*, 77(2): 1205-1221.
- Thiessen, A.H. 1911. Precipitation averages for large areas. *Monthly weather review*, 39(7): 1082-1089.
- Thomas, B.F.; Behrangi, A. & Famiglietti, J.S. 2016. Precipitation intensity effects on groundwater recharge in the southwestern United States. *Water*, 8(3): 1-15.
- Thorndahl, S.; Einfalt, T.; Willems, P.; Nielsen, J.E.; Veldhuis, M.C.; Arnbjerg-Nielsen, K. & Molnar, P. 2017. Weather radar rainfall data in urban hydrology. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(3): 1359-1380.
- USGS, Earth Explorer. 2019. United States Geological Survey. Disponível em:  
< <http://earthexplorer.usgs.gov>>. Acesso em: 28 out. 2019.
- Wilson, J.W. & Brandes, E.A. 1979. Radar measurements of rainfall. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 60: 1048-1058.
- Zhang, M.; Liu, N.; Harper, R.; Li, Q.; Liu, K.; Wei, X. & Liu, S. 2017. A global review on hydrological responses to forest change across multiple spatial scales: Importance of scale, climate, forest type and hydrological regime. *Journal of Hydrology*, 546: 44-59.