



**Campo de Precipitação Proveniente de Medidas
Pluviométricas e Estimativas de Precipitação dos Radares do IPMet**
Precipitation Field from Rainfall Measurements and Rainfall Estimates from IPMet's Radars

Iuri Valério Graciano Borges¹; Demerval Soares Moreira^{1,2} & José Roberto Rozante³

¹Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Faculdade de Ciências, Departamento de Física,
Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube 14-01, 17033-360, Vargem Limpa, Bauru, SP, Brasil

²Centro de Meteorologia de Bauru, Av. Mun. José Sandrin s/n, 17048-699, Chácaras Bauruenses, Bauru, SP, Brasil

³Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Rod. Pres. Dutra s/n, 12630-000 Cachoeira Paulista, SP, Brasil

E-mails: iurivalerio@hotmail.com; demerval.moreira@unesp.br; roberto.rozante@inpe.br

Recebido em: 04/06/2019 Aprovado em: 10/09/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_4_417_426

Resumo

A precipitação é uma variável meteorológica essencial em diversas áreas do conhecimento, tais como agricultura, defesa civil, energia, etc. Entretanto, por ser uma variável descontínua tanto no espaço quanto no tempo, para se obter campos de precipitação com adequada representação espacial e temporal seria necessário uma extensa distribuição de postos pluviométricos, de modo a se ter uma boa interpolação dos dados. Distribuição essa que normalmente não ocorre devido a diversos fatores limitantes como, por exemplo, a geografia da região de estudo e questões econômicas para instalação e manutenção de uma densa rede pluviométrica. Para suprir a falta de dados pluviométricos, este trabalho mesclou os dados de pluviômetros com estimativas de precipitação via radares meteorológicos, obtendo o campo de precipitação denominado "PluRad" com área cobrindo grande parte do estado de São Paulo, norte do Paraná e leste do Mato Grosso do Sul. Esse produto foi comparado com as estimativas de precipitação dos radares do IPMet/UNESP (Centro de Meteorologia de Bauru da Universidade Estadual Paulista), com o produto GPM (*Global Precipitation Measurement*) e com o produto MERGE num acumulado de 24 h para o dia 21/mar/2018, ambos provenientes da composição de dados pluviométricos com estimativas de precipitação via satélite. Os resultados mostraram que o PluRad obteve uma melhor representação da distribuição espacial da precipitação na região analisada, sobretudo devido à alta resolução espacial desse produto.

Palavras chaves: Radar; Pluviômetro; Campo de precipitação

Abstract

Precipitation is an essential meteorological variable in several areas of knowledge, such as agriculture, civil defense, energy, etc. However, it is a variable known to be discontinuous both in space and time. To obtain precipitation fields that seek to have an adequate spatial and temporal representation, it would require an extensive distribution of pluviometric stations to achieve a good interpolation of the data. That distribution normally does not occur due to several limiting factors, such as the geography of the study region and economic issues for installation and maintenance of a dense pluviometric network. In order to overcome the lack of rainfall data, this work merged rain gauges data with estimates by meteorological radars creating a precipitation field called "PluRad" covering most of the state of São Paulo, northern Paraná and eastern Mato Grosso do Sul. This product was compared with the IPMet's (Bauru Meteorological Center) radar precipitation estimates, GPM's (Global Precipitation Measurement) product and the MERGE's product on a 24h's rainfall at March, 21st 2018, both generated from the rainfall data composition with satellite precipitation estimates. The results showed that PluRad has a better representation of the spatial distribution of precipitation in the analyzed region, mainly due to the high spatial resolution of this product.

Keywords: Weather radar; Pluviometer; Precipitation field

1 Introdução

A precipitação é uma das variáveis meteorológicas mais importantes e mais difíceis de se trabalhar devido à sua alta variabilidade espacial e temporal, sendo necessária uma extensa distribuição de postos pluviométricos para que a interpolação gere campos espaciais de boa qualidade (Villarini & Krajewski, 2009; Calvatti *et al.*, 2017; Moreira *et al.*, 2017). Entretanto, a instalação e manutenção desses postos estão atreladas às limitações econômicas e físicas da região, conseqüentemente, o número de pluviômetros geralmente é bem aquém do necessário. Por essa falta de cobertura espacial, em muitas aplicações opta-se por utilizar as estimativas de precipitação via radar ou satélite (Rozante *et al.*, 2010; Heistermann *et al.*, 2013, Moreira *et al.*, 2017). Os produtos gerados por satélites e radares são ferramentas importantes para fornecer informações de regiões onde não há cobertura de estações meteorológicas. Os radares, por exemplo, apresentam uma área de abrangência relativamente vasta, sendo extremamente importantes para previsões chamadas de *nowcasting* - previsões de curto prazo - cujo produto é muito utilizado por sistemas de Defesa Civil, seguradoras, aeroportos, etc. (Heistermann *et al.*, 2013).

As estimativas de precipitação geradas pelos radares se baseiam na refletividade medida de um certo alvo, variando não só pelas suas características físicas, como brilho, tamanho e velocidade radial, mas também pelas características mecânicas do próprio radar, como polarização simples ou dupla, diâmetro da antena, banda de emissão, etc. (Krajewski *et al.*, 2010). O trabalho de Rocha Filho *et al.* (2015), por exemplo, demonstrou que as estimativas de precipitação via radares de dupla polarização são mais eficientes e próximas dos dados pluviométricos do que radares com apenas uma polarização.

A relação que determina através da refletividade recebida de um determinado alvo a quantidade de precipitação associada à mesma é chamada de relação Z-R, que é expressa pela equação

$$Z=aR^b \quad (1)$$

sendo Z a refletividade em mm^6/m^3 , R a taxa de precipitação em mm/h e as constantes “a” e “b” podem

variar de radar para radar em função das diferentes características de cada um e pelas características do alvo, como já descrito anteriormente. Emilio & Landim (2008) fizeram um estudo na região de Assis-SP e Piracicaba-SP e compararam os dados pluviométricos com as estimativas de precipitação dos radares do Centro de Meteorologia de Bauru da Universidade Estadual Paulista (IPMet) empregando três relações Z-R: uma proposta por Marshall & Palmer (1947) ($a=200$, $b=1,6$), a outra proposta por Jones (1956) ($a=486$, $b=1,37$) e a terceira proposta é a encontrada em 2007 pelo pesquisador do IPMet Dr. Roberto Vicente Calheiros (comunicação pessoal) ($a=32$, $b=1,65$). Embora o trabalho do Dr. Calheiros não tenha sido publicado, sua proposta para a relação Z-R foi a que mais se aproximou dos dados pluviométricos segundo o estudo de Emidio & Landim (2008). Esta relação foi obtida utilizando casos de refletividades provenientes dos dois radares do IPMet, os mesmos radares utilizados no trabalho de Emidio & Landim (2008) e também neste trabalho.

Campos de precipitação são comumente utilizados por hidrólogos, oferecendo informações de extremo valor para modelos hidrológicos (Xu *et al.*, 2013). Também são amplamente utilizados na agricultura, energia, defesa civil, e para avaliar modelos numéricos de previsão de tempo e clima (exemplos: Moreira *et al.*, 2013; Bela *et al.*, 2015; Moreira *et al.*, 2017).

Muitos métodos de representação espacial foram desenvolvidos ao longo dos anos de forma a tentar obter uma melhor representação da precipitação utilizando-se de teorias e métodos estatísticos para a interpolação dos dados pluviométricos, os quais se baseiam tanto na distância de uma estação ao ponto estimado quanto na elevação e características geográficas da região estudada (por exemplo, Goovaerts, 1999). Pela complexidade do comportamento espaço-temporal da precipitação, não existe um melhor método a ser adotado, sendo sempre necessário uma análise detalhada das características geográficas da região de estudo, o período estudado, bem como a disponibilidade de estações meteorológicas. Trabalhos como o de Hu *et al.* (2019) resumem esses diversos métodos que foram desenvolvidos com o passar dos anos.

O objetivo principal deste trabalho é apresentar uma técnica que permita combinar dados pluviométricos com estimativas oriundas de radares meteorológicos, com a finalidade de produzir campos de precipitação de boa qualidade, utilizando os dados observados existentes que melhor quantificam a precipitação ocorrida na região de interesse.

2 Material e Métodos

Foram utilizados dados pluviométricos provenientes de redes de estações automáticas (EMA) e convencionais, que são operadas e mantidas pelos centros: INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), IAC (Instituto Agrônomo de Campinas), SIMEPAR (Sistema Meteorológico do Paraná), CEMIG (Companhia Energética de Minas Gerais), ANA

(Agência Nacional de Águas) e CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais), totalizando 334 registros de precipitação para o dia 21 de março de 2018 na região de abrangência dos dois radares do IPMet. Esses dados possuem resolução temporal de 1 hora, com exceção do CEMADEN (5 minutos) e estações convencionais (6 horas). A Figura 1 apresenta a distribuição espacial dos 334 postos pluviométricos utilizados neste trabalho.

Foram utilizadas as três relações Z-R empregadas no trabalho de Emilio & Landim (2008) para obter três estimativas de precipitação provenientes das refletividades observadas nos dois radares meteorológicos do IPMet localizados em Presidente Prudente-SP e Bauru-SP, ambos banda-S, polarização simples, com resolução radial de 750 metros,

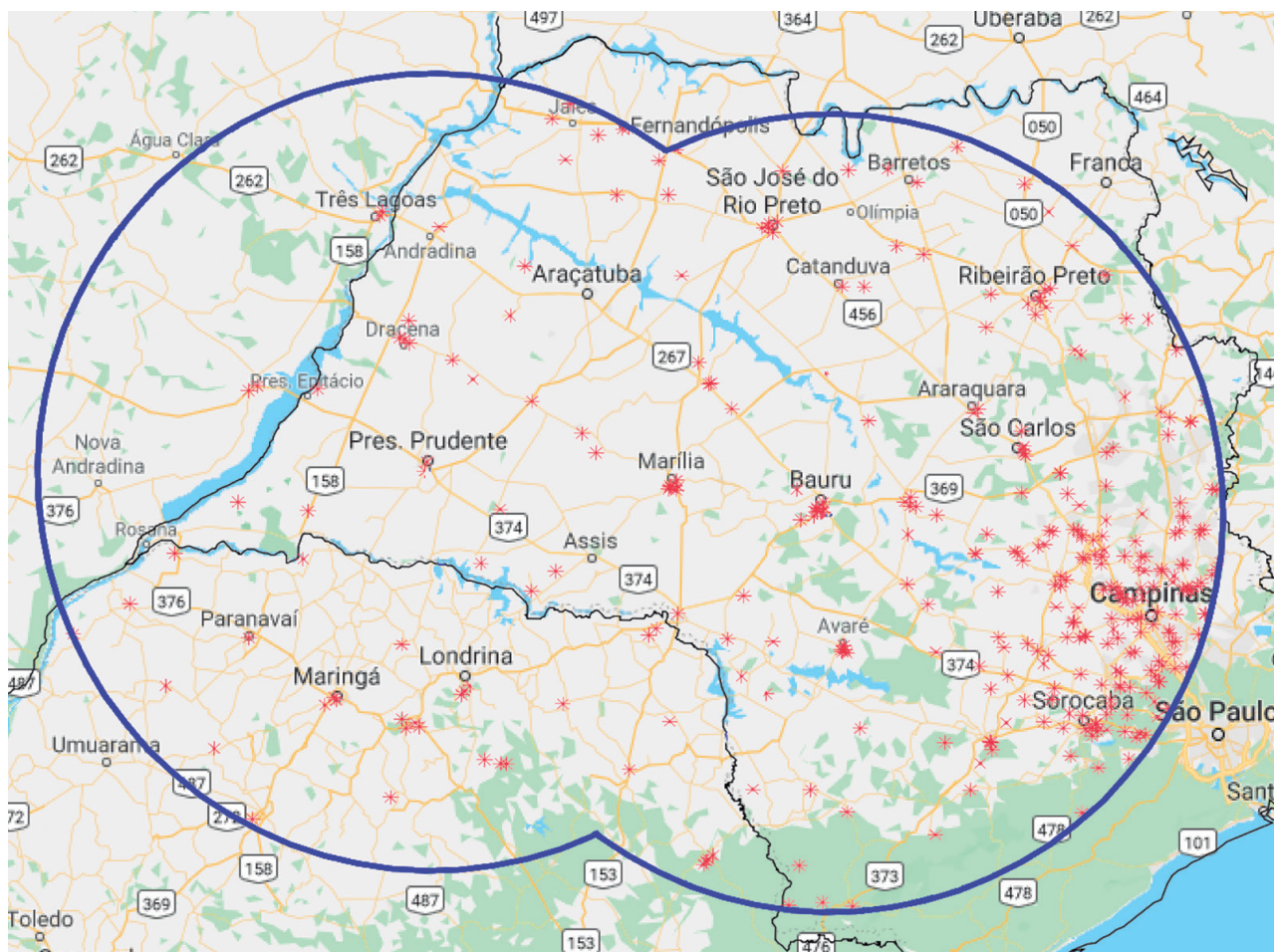


Figura 1 A curva azul representa a área de cobertura do radar de Presidente Prudente-SP e Bauru-SP com as localidades dos pluviômetros (asteriscos vermelhos) utilizados neste trabalho. Fonte do mapa: Google

antena com dois graus de abertura, produto CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*) de 3,5 km de altura e alcance radial de 240 km de cada radar, cobrindo assim grande parte do Estado de São Paulo, norte do Paraná e leste do Mato Grosso do Sul (Figura 1).

Para combinar os dados pluviométricos com as estimativas de precipitação provenientes dos radares foi realizada uma soma ponderada do valor da precipitação registrado no pluviômetro com a estimativa do radar (Equação 2). O campo de precipitação obtido por esse procedimento foi denominado de PluRad, por conter dados de Pluviômetros e dados de Radar. Os pesos foram obtidos por meio de duas funções quadráticas, uma com a concavidade voltada para cima, que fornece o peso para a estimativa de precipitação do radar (Equação 3) e outra com a concavidade voltada para baixo, que fornece os pesos para os dados pluviométricos (Equação 4).

$$PluRad = w_r * r + w_p * p \quad (2)$$

$$w_r = \begin{cases} \frac{1}{R^2} x^2 & se \quad \frac{1}{R^2} x^2 \leq 1 \\ 1 & se \quad \frac{1}{R^2} x^2 > 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$w_p = \begin{cases} -\frac{1}{R^2} x^2 + 1 & se \quad -\frac{1}{R^2} x^2 + 1 \geq 0 \\ 0 & se \quad -\frac{1}{R^2} x^2 + 1 < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Onde r é o valor estimado pelo radar, que estão representados nos pontos de grade da matriz de precipitação, após aplicar a relação Z-R, p é o valor registrado em um determinado pluviômetro, w_r e w_p são os pesos dados para a estimativa do radar e para a observação pluviométrica, respectivamente, R é o raio de influência, em km, dos dados pluviométricos e x é a distância, em km, do pluviômetro ao ponto de grade.

Para este trabalho o raio de influência dos pluviômetros foi considerado como sendo de 7 km. Esse raio foi escolhido de forma que não seja muito pequeno, para dar peso maior às medidas pluviométricas e também que não seja muito grande, pois

poderia distribuir espacialmente precipitações locais em uma grande extensão. Essa escolha também levou em consideração que nuvens tipo *cumulonimbus* geralmente possuem raios nessa ordem de grandeza, conforme discutido no trabalho de Calvatti *et al.* (2017).

A resolução espacial do PluRad ficou sendo a mesma das estimativas de precipitação, ou seja, 0,0075 graus (~750 metros) e a frequência temporal mínima é de 1 hora, a mesma da maioria dos dados pluviométricos. Para se obter o campo de precipitação acumulado em período de tempo maior do que 1 hora, basta acumular os dados observados e as estimativas do radar no período desejado.

Nota-se nas Equações 2 a 4 que no ponto de grade próximo à localização do pluviômetro ($x=0$) o PluRad ficará com valor próximo ao do pluviômetro. A medida que os pontos de grade vão se distanciando da localização do pluviômetro, o PluRad vai se aproximando da estimativa do radar, de forma que após R km de distância do pluviômetro o PluRad fica exatamente igual à estimativa do radar, caso não tenha nenhuma outra medida pluviométrica próxima.

Para exemplificar o comportamento do método, foi imposto um valor hipotético de 5 mm para a medida de um pluviômetro e assumiu-se que a estimativa de precipitação do radar foi constante e igual a 35 mm. Pode-se notar na Figura 2A que as funções quadráticas fazem com que o PluRad seja igual a 5 mm no ponto onde está a estação ($x=0$) e depois vai se aproximando do valor estimado pelo radar até atingir o raio de influência (7 km), a partir daí utiliza-se apenas as estimativas. Na Figura 2B foi configurada uma situação em que a estimativa do radar fosse forte em uma dada região (35 mm) e que tivesse um decaimento até atingir precipitação nula, e nesse intervalo havia uma medida pluviométrica com o valor de 5 mm. Nota-se que, no ponto da estação, o PluRad é sempre igual ao valor medido no pluviômetro. Na Figura 2C pode-se observar que mesmo com o radar colocando uma forte descontinuidade da precipitação, o PluRad é representado por uma curva bem mais suave, caso, é claro, exista observação pluviométrica na região. Na Figura 2D é possível visualizar a configuração assumida pelo

PluRad quando existe mais de uma estação dentro do raio de influência. Nota-se que mesmo que as duas estações registrem valores iguais (5 mm) o PluRad possui uma ligeira elevação entre as duas estações devido ao fato da estimativa do radar estar mais elevada (35 mm).

A Figura 3 mostra a representação espacial da precipitação para o dia 21 de março de 2018 às 0300 UTC, em uma região próxima à cidade de Campinas-SP, tanto estimada pelo radar (Figuras 3A e 3C), quanto pelo produto PluRad (Figuras 3B e 3D). Nessa localidade, nota-se que com a inclusão de dados pluviométricos, a representação espacial da precipitação alterou-se de forma significativa como, por exemplo, aumentando a quantidade dessa variável nas imediações da estação apresentada nas Figuras

3C e 3D (asterisco verde). Nota-se que a precipitação foi elevada de ~3 mm, estimada pelo radar, para ~5 mm, estimada pelo PluRad, devido ao fato de que o pluviômetro dessa estação mediu 5,6 mm.

É possível observar na Figura 3 que, apesar da equação de representação espacial para os pluviômetros seja uma equação quadrática, a forma adquirida no produto não é perfeitamente circular, uma vez que os valores estimados de precipitação do radar também são considerados no produto final.

Nota-se também na Figura 3A que o radar estimou 3 mm de precipitação em torno da estação do INMET localizada em 23,4°S e 47,6°W (asterisco azul), no entanto, o PluRad (Figura 3B) apresenta precipitação nula nessa localidade, pois a estação do INMET não registrou precipitação nesse dia/horário.

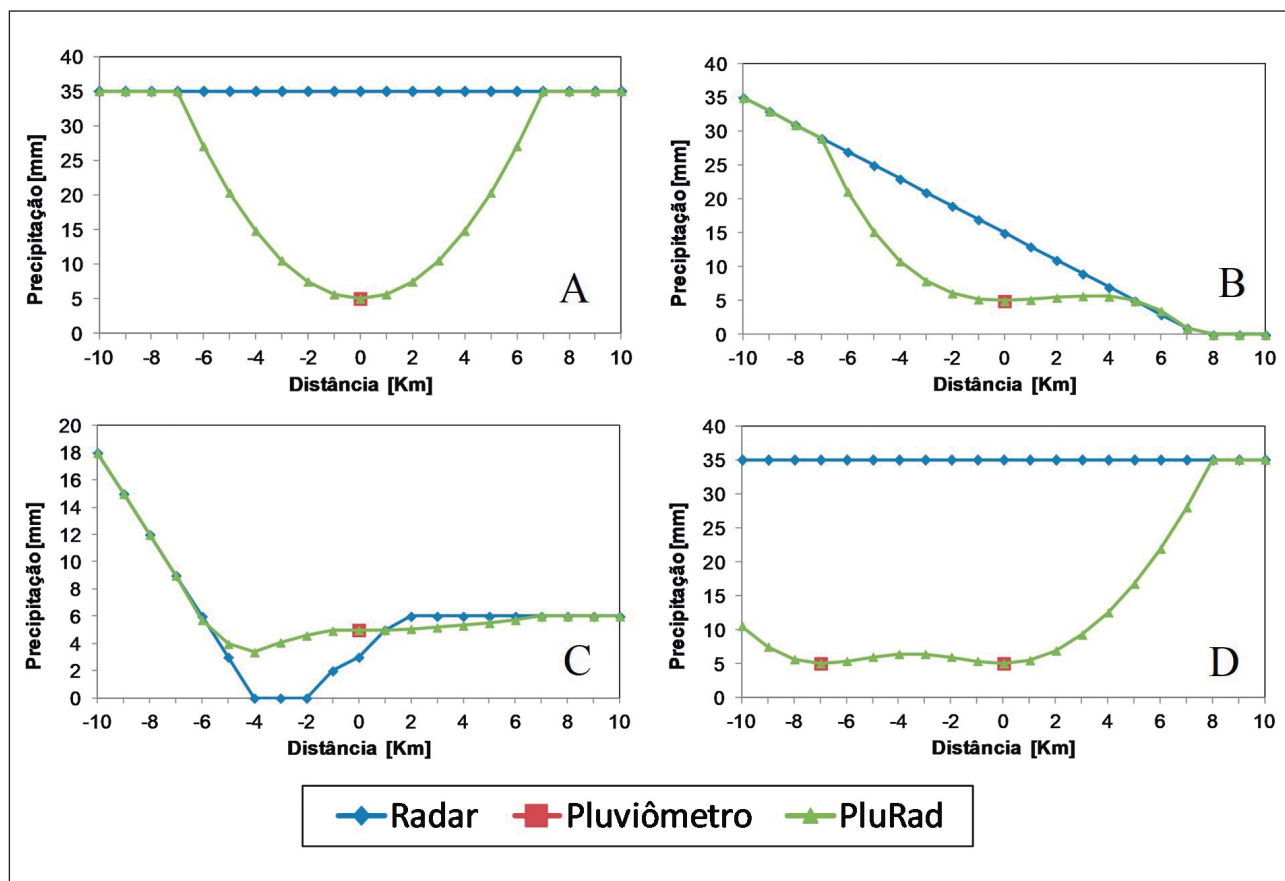


Figura 2 Situações hipotéticas com dados pluviométricos (pontos vermelhos), estimativas do radar (linhas azuis) e resultados do PluRad ao considerar os dados pluviométricos e as estimativas do radar (linhas verdes). Situação hipotética, com um pluviômetro medindo 5 mm de chuva, A para uma estimativa de radar constante (35 mm) ao longo da área demonstrada, B estimativas variando regularmente ao longo desta mesma área, C para variações irregulares e D no caso de haver 2 pluviômetros próximos um do outro. O raio de influência é de 7 km.

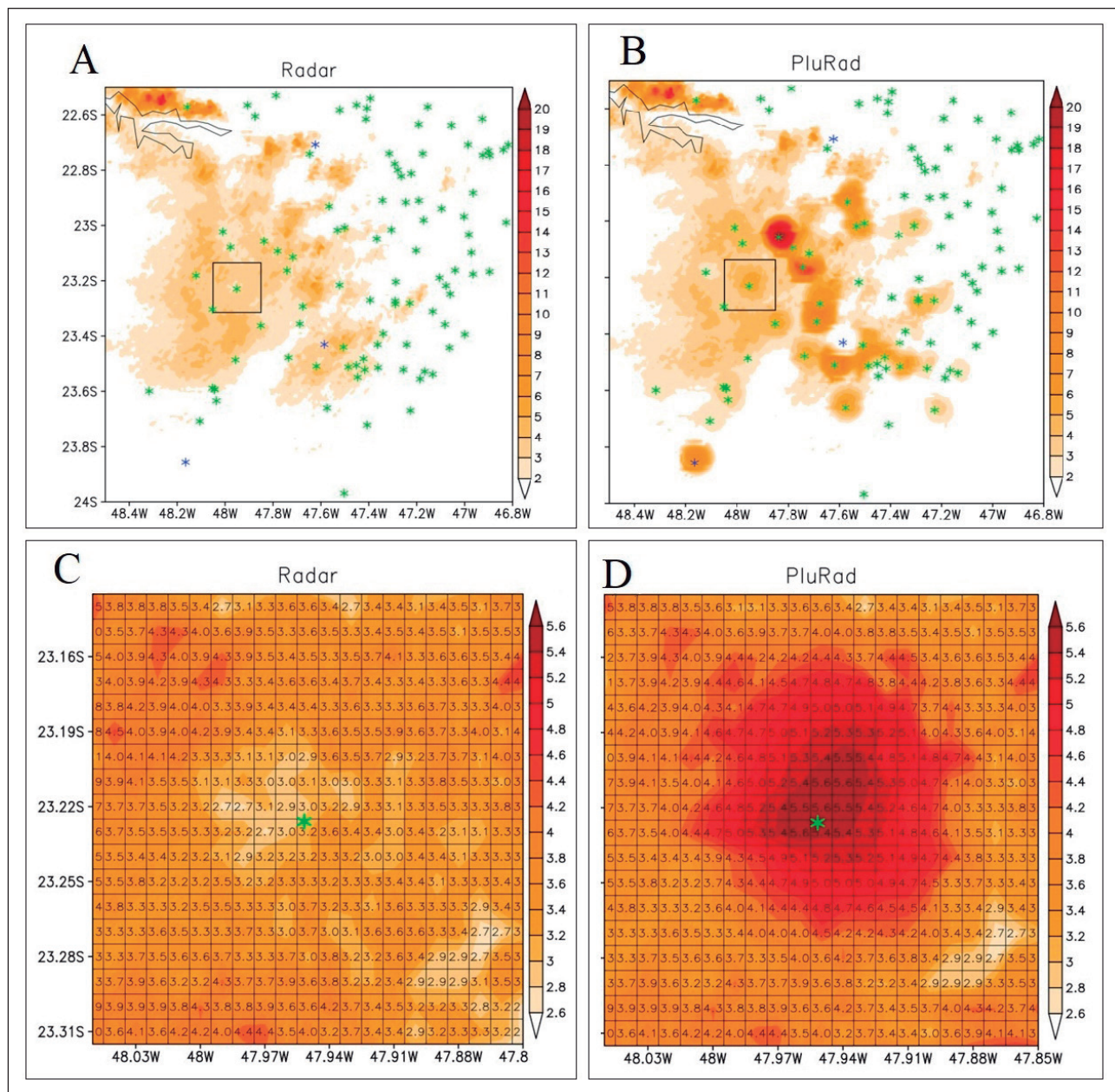


Figura 3 Representação espacial de precipitação estimada pelo radar (A e C) e do produto PluRad (B e D) no dia 21/mar/2018 às 0300 UTC. Os asteriscos azuis representam as localizações das estações do INMET e os verdes as estações do CEMADEN. Os retângulos apresentados em A e B delimitam a região das figuras C e D.

Na Figura 4 é possível observar o comportamento do PluRad no dia 21/mar/2018 às 0300 UTC, em que a estação do CEMADEN registrou precipitação igual a 5,6 mm acumulada em uma hora e o radar estimou para esse mesmo horário e localização precipitações acumuladas em uma hora em torno de 3,2 mm, ou seja, o radar subestimou a precipitação

em torno de 43%. Nota-se que no ponto da estação, o PluRad alterou a estimativa de precipitação do radar (3,2 mm) pela observada no pluviômetro (5,6 mm). Nos pontos vizinhos da estação, no raio de 7 km, o PluRad considerou tanto o valor registrado pelo pluviômetro (5,6 mm) quanto as estimativas do radar (~3,4 mm). Fora do raio de 7 km, e por não ter

nenhuma outra estação próxima, o PluRad ficou exatamente igual à estimativa de precipitação do radar. A subestimativa do radar pode ter ocorrido devido a diversos fatores, tais como: i) uso de uma equação Z-R não adequada para o sistema atuante; ii) atenuação sofrida por gases/partículas ou precipitação ocorrida sobre o radar, molhando o radome e assim acentuando a atenuação; iii) devido à baixa resolução temporal de varredura dos radares (7,5 minutos), o momento de maior taxa de precipitação pode não ter sido capturada pelo radar. Já os pluviômetros coletam a chuva de forma contínua, então, se ocorrer uma forte taxa de precipitação entre as duas varreduras do radar, ela será contabilizada nos dados pluviométricos, mas, não entrará na estimativa de precipitação do radar, ocorrendo, portanto, a subestimativa.

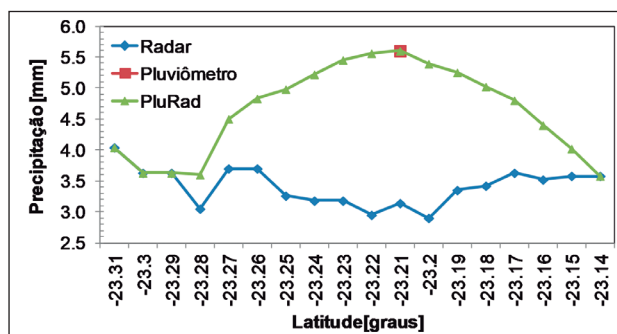


Figura 4 Idem às Figuras 3C e 3D, exceto mostrando o comportamento do PluRad na longitude da estação do CEMADEN (47,95°W).

A metodologia aqui empregada foi desenvolvida em linguagem Fortran 90, possibilitando a inclusão de novas redes pluviométricas. A escolha da relação Z-R a ser utilizada é realizada alterando no código os parâmetros “a” e “b”. Pode-se obter campos acumulados no período desejado, bastando entrar como argumento a data inicial e final do período a ser acumulado. Para executar vários campos de precipitação foi desenvolvido um *script* em linguagem *Shell* que varia automaticamente as datas iniciais e finais, executando-se o programa para todos os períodos desejados. Também é possível utilizar dados de refletividade de outros radares, desde que os dados estejam em uma grade regular e no formato *ascii*. A utilização de duas funções quadráticas tem a vantagem de considerar maior peso para os dados pluviométricos sem suavizar os valores observa-

dos nos pluviômetros. Já a análise de Barnes (Barnes, 1973), metodologia aplicada por Rozante *et al.* (2010) para combinar as estimativas de satélite com dados pluviométricos, possui a característica de “espalhar” a precipitação observada nos pluviômetros ao longo dos pontos de grade vizinhos, suavizando assim os dados pluviométricos. Outra vantagem desse método da função quadrática é o baixo custo computacional. No caso da análise de Barnes, seria necessário um maior poder de processamento ou aplicar a técnica do paralelismo para conseguir gerar campos espaciais em alta resolução sem demandar muito tempo.

Devido ao fato do PluRad já fazer uso dos dados pluviométricos e não alterar os valores desses, não existem formas quantitativas para avaliar o produto gerado, a menos que existisse uma rede densa de pluviômetros que pudesse gerar o PluRad sem a utilização de um conjunto de pluviômetros e depois avaliar em função desse conjunto retirado. Dessa forma, optou-se por uma validação qualitativa, comparando o campo do PluRad, contendo a precipitação acumulada em 24 h de um dia com grande ocorrência de chuva no estado de São Paulo, com outros campos de precipitação como o MERGE (Rozante *et al.*, 2010), o GPM (*Global Precipitation Measurement*), que utilizam estimativas de precipitação via satélites e com a própria estimativa de precipitação dos radares do IPMet.

As imagens do satélite *Geostationary Operational Environmental Satellite (GOES)-16* (canal 13), disponíveis na página do CPTEC/INPE (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) foram utilizadas para escolher um dia em que houve muita nebulosidade sobre o estado de SP, e com alto índice pluviométrico. Assim, para avaliar o PluRad foi escolhido o dia 21/mar/2018, pois havia um forte sistema convectivo sobre o estado de São Paulo, conforme apresentado na Figura 5.

3 Resultados

A estimativa de precipitação de radar que mais se aproximou do volume de chuva observada nos pluviômetros no dia 21/mar/2018 foi a que

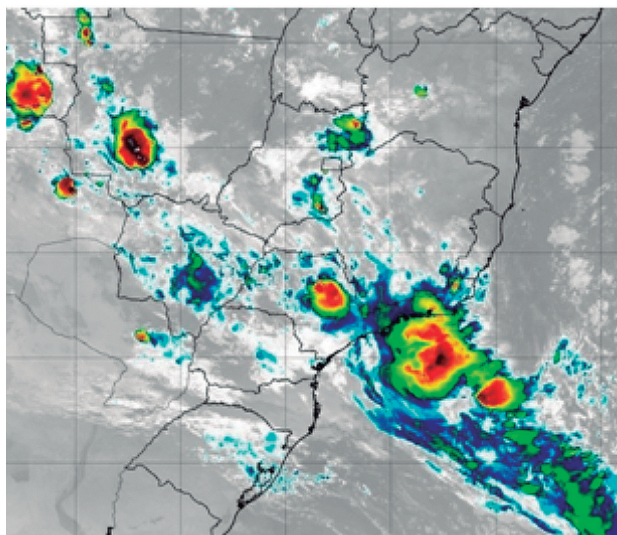


Figura 5 Imagem de Satélite (GOES-16) no canal 13 (Infravermelho) do dia 21/mar/2018 às 0600 UTC. Fonte: CPTEC/INPE.

utilizou a relação Z-R proposta pelo Dr. Calheiros, conforme também encontrado por Emidio & Landim (2008). Então, optou-se em utilizar neste trabalho a estimativa de precipitação do radar obtida por essa relação Z-R.

Foi calculado o PluRad para o dia 21 de março de 2018 a partir dos dados de refletividade dos dois radares do IPMet (das 1200 UTC do dia 20/mar/2018 às 1200 UTC do dia 21/mar/2018) e os dados pluviométricos com precipitação acumulada nesse mesmo período. A Figura 6 apresenta o PluRad obtido para esse dia, a estimativa de precipitação dos radares e os campos de precipitação provenientes do MERGE (Rozante *et al.*, 2010) e do GPM (NASA, 2016), todos acumulados em 24 h para o mesmo período.

O GPM e o MERGE possuem resolução espacial de 0,1 grau, já a estimativa de precipitação

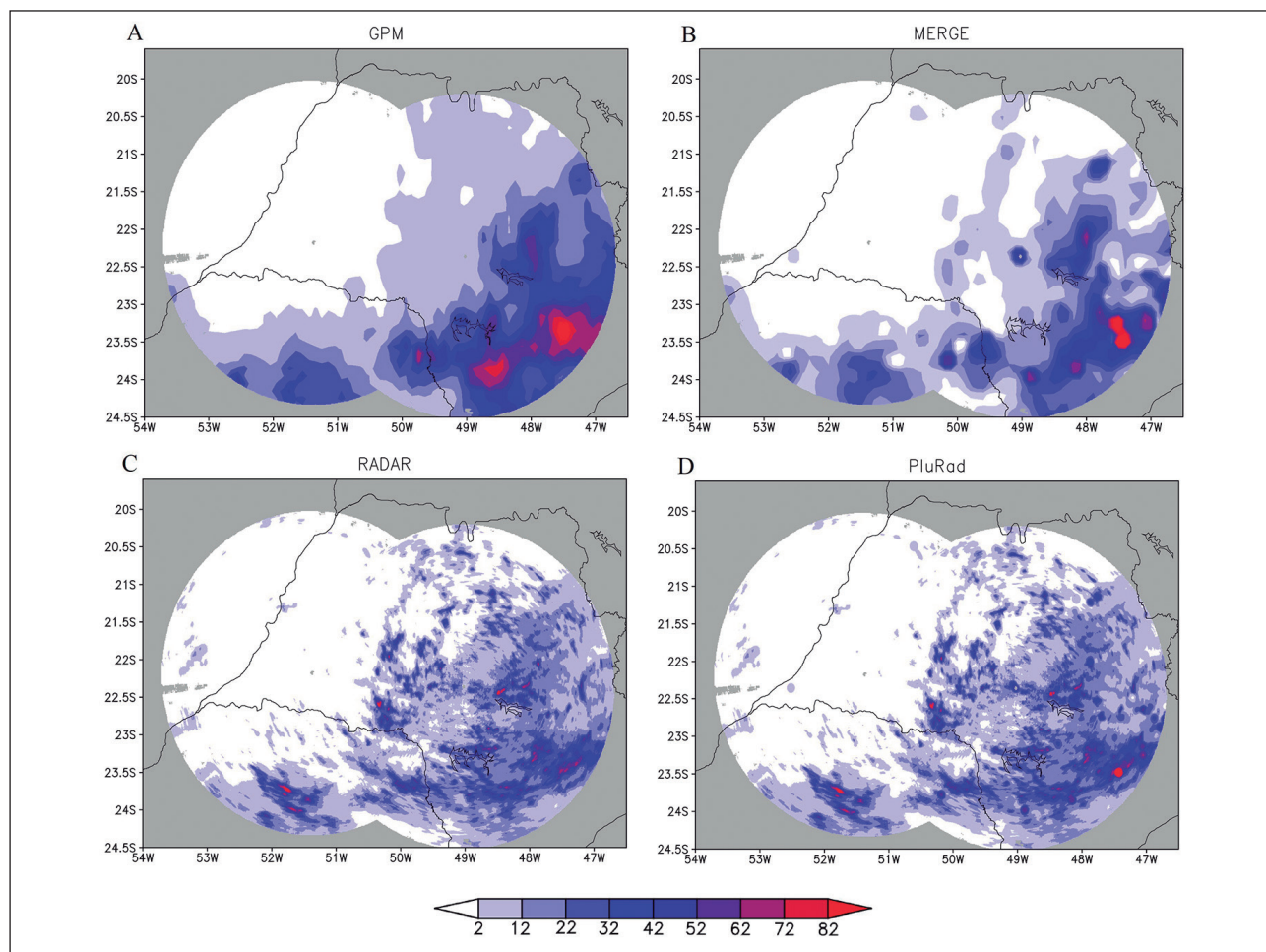


Figura 6 Campo de precipitação acumulado em 24 h (mm/24h) do dia 21/mar/2018, Sendo A. GPM; B. MERGE; C. estimativas de precipitação dos radares de Presidente Prudente e Bauru e D. PluRad.

dos radares e o PluRad possuem resolução espacial de 0,0075 grau. Dessa forma, pode-se observar na Figura 6 que a estimativa dos radares e o PluRad possuem bem mais detalhamento do que o GPM e o MERGE. No entanto, é possível observar padrões semelhantes em todos os quatro campos de precipitação. Por exemplo, é possível notar que a chuva ficou mais concentrada no centro-leste do estado de São Paulo e ocorreu forte precipitação na região de Campinas-SP e Maringá-PR, no entanto, devido à baixa resolução dos produtos GPM e MERGE, o núcleo de precipitação mostrou-se extrapolado para uma região muito maior do que o apresentado pelo radar e pelo PluRad.

Também é possível identificar na Figura 6 algumas diferenças no campo de precipitação que não estão relacionadas com a resolução espacial. Por exemplo, nota-se que o GPM aparentemente superestimou bastante a abrangência da precipitação que ocorreu próxima de Sorocaba-SP (23,5°S e 48,5°W), distribuindo uma precipitação de 82 mm em uma área muito maior, se comparado com os outros três campos. Deve-se destacar que, se o núcleo de precipitação fosse tão grande como o GPM estimou, provavelmente esse núcleo teria aparecido na estimativa do radar (Figura 6C) e consequentemente no PluRad (Figura 6D). É possível notar que tanto o MERGE (Figura 6B) quanto o PluRad (Figura 6D) apresentam um núcleo forte nessa região, mas em escala espacial muito menor do que a apresentada no produto GPM, sendo no PluRad a menor delas. Devido a distância que esse núcleo está para o radar mais próximo, o mesmo não pode estimar a precipitação de forma precisa, conforme pode-se observar na Figura 6C.

Próximo a Maringá-PR também se nota um núcleo de precipitação subestimado pelo GPM e pelo MERGE. Já o PluRad manteve a precipitação identificada pelo radar, uma vez que não haviam estações localizadas na região para agregar ao campo gerado.

No nordeste do estado de São Paulo, próximo a 22°S e 48°W, é possível visualizar tanto no MERGE quanto no GPM um núcleo de chuva com dimensões espaciais semelhantes entre si. Já o PluRad e o

radar, identificaram dois pequenos e fortes núcleos de precipitação, que provavelmente estão associados a dois *cumulonimbus* isolados.

A qualidade do PluRad é melhor em regiões próximas aos radares do que em regiões distantes, uma vez que, a atenuação é proporcional à distância em que o alvo se encontra do radar e devido à abertura dos feixes do radar. Assim, os dados pluviométricos passam a ter contribuições mais efetivas em regiões distantes dos radares, como pode ser observado comparando as Figuras 6C e 6D, onde núcleos significativos de precipitação ocorridos próximos à cidade de Sorocaba-SP aparecem relativamente fracos na estimativa do radar (Figura 6C), mas apareceram bem fortes no PluRad (Figura 6D).

4 Conclusões

Diante dos resultados apresentados, é possível concluir que o PluRad consegue agregar os dados pluviométricos com as estimativas de precipitação de radares meteorológicos, gerando campos de precipitação em uma grade regular de alta resolução espacial para uma extensa área e, principalmente, em regiões remotas que possuem poucas observações pluviométricas. O método apresentado consegue concatenar os dados pluviométricos com as estimativas de precipitação dos radares dando maior peso para os dados pluviométricos, de forma que na localização do pluviômetro o valor do PluRad é exatamente igual ao que foi medido pelo pluviômetro. O PluRad também mostra a estimativa de precipitação realizada pelo radar em regiões com ausência de pluviômetros, assim, ele consegue reunir em um mesmo campo as informações dos pluviômetros, que podem ser consideradas como sendo a precipitação que realmente caiu na localidade e também apresenta para as áreas onde não possui pluviômetros uma estimativa da precipitação baseada nas refletividades observadas pelo radar. No entanto, para se obter bons campos de precipitação é necessário ter boas estimativas de precipitação e também bons dados pluviométricos, que são obtidos utilizando redes pluviométricas confiáveis.

A resolução espacial do PluRad é uma característica importante, fornecendo um melhor de-

talhamento espacial do campo, se comparado com as estimativas provenientes de imagens de satélite. A equação quadrática empregada para a distribuição espacial da precipitação nas regiões próximas aos postos pluviométricos demonstrou ser um método eficiente de compor as informações pluviométricas com as estimativas de radares meteorológicos, sobretudo em eventos de chuva provenientes de sistemas convectivos, cujas baixas escalas temporais e espaciais geralmente fazem com que os radares, e também os satélites, não detectam as chuvas provenientes desses sistemas.

O PluRad pode tanto aumentar a precipitação estimada pelo radar, em uma certa região, quanto diminuir, dependendo do valor observado no pluviômetro. Esse comportamento do PluRad pôde ser observado no exemplo do sistema precipitante que atuou sobre o estado de São Paulo no dia 21/mar/2018. Deve-se ressaltar que não foram apresentados neste trabalho outros eventos de precipitação, uma vez que apenas iria alterar as posições e as intensidades da precipitação, mas o comportamento do PluRad seria semelhante ao já apresentado.

É possível inserir outros bancos de dados de pluviômetros ao sistema do PluRad de forma a ampliar a rede de dados pluviométricos no campo de precipitação, aumentando assim a sua qualidade, pois, como já discutido, quanto maior a cobertura de pluviômetros, maior a aproximação com o valor real de precipitação na área de estudo. A utilização de radares com dupla polarização também ajudaria a melhorar o resultado do produto, pois, as estimativas de precipitação via radares de dupla polarização são mais eficientes e próximas de dados observados do que radares com apenas uma polarização, que é o caso dos radares do IPMet utilizados neste trabalho.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem ao IPMet e a todos os centros que forneceram os dados pluviométricos, tornando-se possível a realização deste trabalho.

6 Referências

- Barnes, S.L. 1973. Mesoscale objective map analysis using weighted time-series observations. *NOAA Tech. Memo. National Severe Storms Laboratory*, Norman, OK, 62: 1-66.
- Bela, M.M.; Longo, K.M.; Freitas, S.R.; Moreira, D.S.; Beck, V.; Wofsy, S.C.; Gerbig, C.; Wiedemann, K.; Andreae, M.O. & Artaxo, P. 2015. Ozone production and transport over the Amazon Basin during the dry-to-wet and wet-to-dry transition seasons. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(2): 757-782.
- Calvatti, L.; Beneti, C.; Neundorff, R.L.A.; Inouye, R.T.; Santos, T.N.; Gomes, A.M.; Herdies, D.L. & Gonçalves, L.G.G. 2017. Quantitative precipitation estimation integrated by Poisson's equation using radar mosaic, satellite and rain gauge network. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(5): 1-11
- Emidio, Z.P. 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.
- Goovaerts, P. 1999. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, 228: 113-129.
- Heistermann, M.; Jacobi, S. & Pfaff, T. 2013. Technical Note: An open source library for processing weather radar data (wradlib). *Hydrology and Earth System Sciences*, 17: 863-871.
- Hu, Q.; Li, Z.; Wang, L.; Huang, Y.; Wang, Y. & Li, L. 2019. Rainfall Spatial Estimations: A Review from Spatial Interpolation to Multi-Source Data Merging. *Water*, 11(509): 1-30
- Jones, D.M.A. 1956. Rainfall drop-size distribution and radar reflectivity. *Urban Meteorology Laboratory: State Water Survey*, Illinois, 6: 1-20.
- Krajewski, W.F.; Villarini, G. & Smith, A. 2010. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(1): 87-94.
- Marshall, J.S.; Langille, R.C. & Palmer, W.McK. 1947. Measurement of rainfall by radar. *Journal of Meteorology*, 4(6): 186-192.
- Moreira, D.S.; Freitas, S.R.; Bonatti, J.P.; Mercado, L.M.; Rosário, N.M.É.; Longo, K.M.; Miller, J.B.; Gloor, M. & Gatti, L.V. 2013. Coupling between the JULES land-surface scheme and the CCATT-BRAMS atmospheric chemistry model (JULES-CCATT-BRAMS1.0): applications to numerical weather forecasting and the CO2 budget in South America. *Geoscientific Model Development*, 6(4): 1243-1259.
- Moreira, D.S.; Longo, K.M.; Freitas, S.R.; Yamosoe, M.A.; Mercado, L.M.; Rosário, N.E.; Gloor, E.; Viana, R.S.M.; Miller, J.B.; Gatti, L.V.; Wiedemann, K.T.; Domingues, L.K.G. & Correia, C.C.S. 2017. Modeling the radiative effects of biomass burning aerosols on carbon fluxes in the Amazon region. *Atmos. Chem. Phys.*, 17: 14785-14810.
- NASA. 2016. National Aeronautics and Space Administration. Global Precipitation Measurement (GPM) Microwave Imager (GMI) Level 1B (L1B) Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). *National Aeronautics and Space Administration: Goddard Space Flight Center*, 93p.
- Rocha Filho, K.L.; Conde, F. & Andrioli, C.P. 2015. Estimativas de Precipitação no Leste de São Paulo com Radar de Dupla Polarização. In: XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2015, Brasília/DF. *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 8p.
- Rozante, J.R.; Moreira, D.S.; de Gonçalves, L.G. & Vila, D.A. 2010. Combining TRMM and Surface Observations of Precipitation: Technique and Validation over South America. *Weather Forecasting*, 25: 885-894.
- Villarini, G. & Krajewski, W.F. 2009. Empirically based modeling of radar-rainfall uncertainties for a C-band radar at different time-scales. *Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society*, 135: 1424-1438.
- Xu, H.; Xu, C.; Chen, H.; Zhang, Z. & Li, L. 2013. Assessing the influence of rain gauge density and distribution on hydrological model performance in a humid region of China. *Journal of Hydrology*, 505: 1-12.