






Artigo

Espacialização da Precipitação Diária em Bacias Hidrográficas do Sul do Espírito Santo

Pablo Francisco Benitez Baratto¹ , Roberto Avelino Cecílio^{2,3} ,
David Bruno de Sousa Teixeira² , Sidney Sara Zanetti³ , Alexandre Cândido Xavier³ 

¹*Departamento de Solos e Recursos Naturais, Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, SC, Brasil.*

²*Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, Brasil.*

³*Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil.*

Recebido em: 1 de Abril de 2022 - Aceito em: 5 de Outubro de 2022

Resumo

Dados espacializados de precipitação diária são úteis para diversas aplicações relacionadas à meteorologia aplicada e à hidrologia, tais como a detecção de mudanças climáticas, estudo de inundações, e compreensão da interação do clima com os processos hidrológicos e biogeoquímicos. Contudo, cada espacialização da chuva deve ser avaliada para uma determinada região específica antes de sua ampla utilização. Nesse sentido, o presente trabalho objetivou, para as bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo (bioma Mata Atlântica), a avaliação de métodos de interpolação espacial, a criação de uma base de dados espaciais de precipitação diária em formato grid, e a comparação desta base com outras bases de dados de precipitação diária em formato grid. A avaliação dos interpoladores foi feita por meio de validação cruzada, na qual o método da Distância Angular Ponderada (ADW) apresentou melhor desempenho. A aplicação do ADW, para todos os dias do período entre 1980 e 2018, originou uma base de dados de precipitação diária em formato grid com resolução espacial de 0,01°. A base de dados criada teve desempenho semelhante à de XAVIER para a representação espacial das chuvas na região, sendo melhor que as demais avaliadas.

Palavras-chave: ADW, Random Forest, CHIRPS, interpolação, precipitação.

Spatialization of Daily Rainfall in Hydrographic Basins in the South of Espírito Santo

Abstract

Spacialized daily precipitation data are useful for several applications related to Applied meteorology and hydrology, such as detecting climate change, studying floods, and understanding the interaction of climate with hydrological and biogeochemical processes. In addition, each spatialization of rain must be analyzed for a given region. In this sense, the work aimed for the hydrographic basins of the South of Espírito Santo, the evaluation of spatial interpolation methods, the creation of a spatial database of daily precipitation in a grid format, and the comparison of this base with other daily precipitation databases in a grid format. The hydrographic basins were chosen because they are located within the Atlantic Forest biome. The evaluation of the interpolators was carried using means of cross-validation, in which the Weighted Angular Distance (ADW) method presented the best performance. The application of ADW for every day of the period between 1980 and 2018, originated a database of daily precipitation in a grid format and with a spatial resolution of 0.01°. The database created had a performance similar to that of XAVIER for the spatial representation of rainfall in the region, being better than others also evaluated.

Keywords: ADW, Random Forest, CHIRPS, interpolation, precipitation.

1. Introdução

O conhecimento dos comportamentos espacial e temporal da precipitação é essencial para a maioria dos estudos ambientais, como o monitoramento de secas, o planejamento do manejo de bacias hidrográficas (Aslami *et al.*, 2019), a detecção de mudanças climáticas (Salviano *et al.*, 2016; Trenberth, 2011), a prevenção contra inundações (Madsen *et al.*, 2014; Schumacher, 2016), e o entendimento da interação meteorológica com os processos terrestres hidrológicos e biogeoquímicos (Hofstra *et al.*, 2008). Portanto, medições confiáveis da precipitação são essenciais. Estas medições podem ser feitas de diversas formas; todavia, registros de estações de dados medidos em superfície são considerados os mais precisos para a obtenção de informações sobre os totais precipitados (Pessi *et al.*, 2019; Simpson *et al.*, 2017). No entanto, a rede pluviométrica espacialmente esparsa e os registros muitas vezes incompletos dificultam o uso destas informações em bases diárias (Almeida *et al.*, 2015; Maidment *et al.*, 2017), em especial, no Brasil.

Devido à essa escassez de dados de precipitação diária medidos no Brasil, torna-se necessário encontrar alternativas para o estudo das chuvas no País, como o uso dos *grids* contendo dados de chuva obtidos por sensoriamento remoto, ou por interpolação espacial de dados de chuva medidos em estações (Bier e Ferraz, 2017; Guo *et al.*, 2020).

Os dados de chuvas em formato de grade (*grid*), oriundos de sensoriamento remoto, podem fornecer informações de precipitação onde não há estações (Darand

et al., 2017). O uso destes dados é necessário devido à heterogeneidade temporal e espacial das chuvas, sendo imprescindível extrapolar as medições pontuais (estações *in situ*) para obtenção de informações em locais sem medição (Sloat *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2011). No que tange às informações climáticas, existem bases de dados de precipitação disponíveis, criadas em projetos de pesquisa específicos. Estas bases estão disponibilizadas no formato *grid*, a exemplo do CHIRPS, SM2RAIN-ASCAT e TRMM (Brocca *et al.*, 2014; Ceccherini *et al.*, 2015; Prakash, 2019). Todavia, os produtos gerados por estas bases de dados cobrem uma extensa região do globo terrestre e, por consequência, sua resolução espacial é pequena (*pixels* grandes). Mesmo com os avanços tecnológicos dos últimos anos, a baixa resolução dificulta sua ampla utilização (Falck *et al.*, 2016; He *et al.*, 2016), sendo necessária a realização de estudos que evidenciem sua adequabilidade para regiões específicas.

Com relação à interpolação espacial de variáveis climáticas diárias, especificamente a chuva, sua viabilidade depende da disponibilidade da rede de pluviômetros e da seleção de um método de interpolação espacial apropriado. Tal método deve considerar a variabilidade da chuva relacionada com outros fatores que influenciam os padrões de precipitação na região de interesse, como mudanças nos regimes de precipitação devido ao uso da terra e características topográficas e meteorológicas (Yeggina *et al.*, 2019). Desta forma, para definir qual método de interpolação é o mais indicado para a espacialização da precipitação diária em determinada região, é necessário analisar o desempenho de diferentes interpoladores espa-

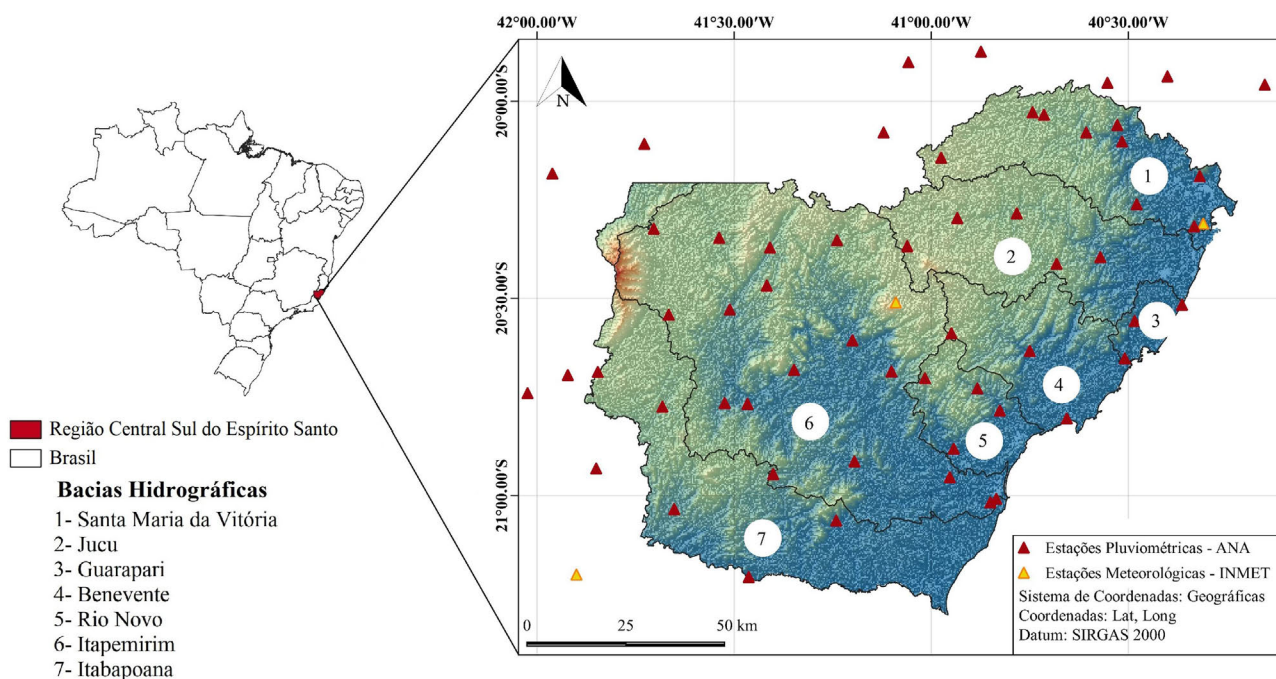


Figura 1 - Estações pluviométricas e meteorológicas nas bacias hidrográficas do Sul do Espírito Santo.

ciais (Chen *et al.*, 2017; Yin *et al.*, 2019) antes de aplicá-los.

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo geral o estudo da espacialização de dados diários de precipitação do sul do Espírito Santo, considerando o período de 1980 a 2018. Os objetivos específicos foram: a) avaliar diferentes interpoladores espaciais para a espacialização dos totais precipitados diários; b) criar uma base dados de precipitação diária, em formato *grid* e com resolução espacial de 0,01°; c) comparar a base de dados criada com outras bases de dados de precipitação diária atualmente existentes.

2. Metodologia

2.1. Área de estudo

A área de estudo consiste em bacias hidrográficas do sul do estado do Espírito Santo (Benevente; Guarapari; Itabapoana; Itapemirim; Jucu; Rio Novo e Santa Maria da Vitória), que, em conjunto, abrangem uma área de drenagem de 14.604 km² (AGERH, 2019), cerca de 31,70% da área total do Estado. Essas bacias estão localizadas entre os paralelos 39°41'17" e 41°52'47" S e entre os meridianos 17°53'30" e 21°18'06" W, conforme apresentado na Fig. 1.

As áreas em estudo estão situadas no bioma Mata Atlântica, que possui grande importância nacional e internacional, por conter, segundo MMA (2010a), a maior diversidade de flora do mundo por unidade de área. Em relação à fauna, o fato mais expressivo é a enorme quantidade de espécies endêmicas, ou seja, que não podem ser encontradas em nenhum outro lugar do planeta.

O bioma Mata Atlântica está distribuído ao longo de quase toda a faixa continental Atlântica leste do Brasil. Originalmente, mais de 1,3 milhões de km² em 17 estados do território brasileiro eram cobertos por essas florestas, porém, atualmente, restam cerca de 27% de sua cobertura original, devido ao desmatamento e queimadas (Jesus *et al.*, 2020; MMA, 2010b).

Contudo, apesar da pouca extensão territorial, o Espírito Santo apresenta uma variabilidade climática significativa, a qual se deve à presença de suas duas distintas regiões naturais: o litoral, que se estende na direção nortesul por 400 km, e o planalto (Regoto *et al.*, 2018), situado a oeste, após o litoral. Segundo Alvares *et al.* (2014) a classificação climática de Köppen-Geiger é Aw (clima tropical) e ocorre em toda a região costeira, juntamente com as classificações Am (clima tropical úmido ou subúmido) e Af (clima tropical úmido ou superúmido), contornando os vales e planaltos em altitudes inferiores a 450 m, porque acima dessa elevação a temperatura média anual é inferior a 18 °C (Alvares *et al.*, 2014).

2.2. Dados

Utilizaram-se dados diários de total precipitado, para o período de 1980 a 2018, medidos em 72 estações pluviométricas, cuja distribuição espacial está apresentada na Fig. 1.

Os dados de precipitação foram obtidos de forma direta através de consulta ao portal HidroWeb da Agência Nacional de Águas (ANA) e, através do Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Ademais, os dados utilizados no presente trabalho são dados consistidos pela ANA e dados brutos (em raros casos).

2.3. Avaliação dos interpoladores espaciais

Avaliaram-se diferentes interpoladores espaciais indicados na literatura: o Inverso da Distância Ponderada (IDW), a Distância Angular Ponderada (ADW), a Krigagem Ordinária (OK) e o *Random Forest* (RF) (Cai *et al.*, 2019; Camera *et al.*, 2014; Hengl *et al.*, 2018; Mendez *et al.*, 2019; Xavier *et al.*, 2015).

Para essa avaliação utilizou-se a técnica de validação cruzada, a qual, segundo Li *et al.* (2011), é uma técnica de avaliação de erros de estimativas que consiste na comparação de valores estimados com os observados. A validação cruzada foi aplicada utilizando-se o procedimento *leave one out*, no qual uma estação específica é retirada da base de dados, sendo a interpolação realizada e o valor de precipitação estimado no local da estação removida. Posteriormente, a estação retorna à base de dados e o procedimento é repetido para todas as demais estações disponíveis (Faraco *et al.*, 2008). Este procedimento foi aplicado para cada interpolador em cada dia da série histórica.

Finalmente, a partir dos valores de totais precipitados observados (O_i) e estimados (E_i) por cada interpolador, calcularam-se as estatísticas de desempenho descritas nas Eqs. (1)-(3) (Hallak e Pereira Filho, 2011; Ceccherini *et al.*, 2015; Machado *et al.*, 2015; Santos *et al.*, 2019; Xavier *et al.*, 2015).

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \right] \quad (1)$$

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n O_i - E_i \quad (2)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2} \quad (3)$$

em que d é o índice de concordância de Willmott (Willmott, 1981), adimensional; $BIAS$ é o desvio sistemático do valor real, mm; $RMSE$ é a raiz do quadrado médio do erro, mm; E_i são os totais precipitados diários estimados, mm; O_i são os totais precipitados diários observados, mm; \bar{O} é

a média dos valores de precipitação observados, mm; e n indica o número total de dias.

As métricas estatísticas descritas nas Eqs. (1)-(3) foram utilizadas para eleger o melhor interpolador e a melhor base de dados de precipitação diária em *grid* de acordo com o método descrito em Schumacher *et al.* (2020).

2.3.1. Distância angular ponderada (ADW)

A ponderação de distância angular (ADW) é uma abordagem comum para interpolação de uma rede irregular de observações meteorológicas em uma grade regular. Uma versão amplamente usada do ADW emprega a distância de decaimento de correlação (CDD) para selecionar estações que devem contribuir para cada estimativa do ponto de grade e definir o componente de distância dos pesos das estações (Hofstra e New, 2009). Esta ponderação das estações vizinhas é calculada usando as distâncias e os ângulos entre as estações vizinhas (O_k) e a estação desconhecida (E_k) (Xavier *et al.*, 2015).

O ângulo, a distância e os pesos foram combinados para chegar a um peso de distância angular (W_{E_k}) para estação E_k (New *et al.*, 2000), como apresentado na Eq. (4), onde o peso a_k é calculado pela Eq. (5) e está associado a cada estação de apoio para interpolação. Este peso foi determinado pelo isolamento direcional (angular) de cada um dos n_j pontos dos dados selecionados. Outro fator associado ao peso da distância é o peso angular (a_k) para cada uma das $n_j = 8$ (utilizado neste trabalho) estações selecionadas para a interpolação.

$$W_{E_k} = w_k(1 - a_k) \quad (4)$$

$$a_k = \frac{\sum_{l=1}^{n_j} w_l (1 - \cos\theta_j(k, l))}{\sum_{l=1}^{n_j} w_l}, \quad l \neq k \quad (5)$$

onde $\theta_j(k, l)$ é o ângulo formado pelas estações O_l e O_k com o vértice no ponto de interpolação de interesse (E_j), calculado em coordenadas esféricas. O w_l é o peso da distância nos pontos de dados observados (O_l e O_k).

O peso da distância é calculado usando uma função de decaimento de correlação (CDD), em que CDD é derivado empiricamente (New *et al.*, 2000), onde x é a distância do ponto em grade de interesse (dado que será estimado) e uma estação meteorológica nas proximidades (dados observados) e, para cada estação calcula-se a correlação (r) em todas as outras estações, como apresentado na Eq. (6).

$$r = \exp^{-x/\text{CDD}} \quad (6)$$

Para calcular o peso w_k , utilizou-se a Eq. (7). Pode-se notar que o peso decai para valores mais altos de m . Sabendo que m é o expoente para cada variável que será

interpolada, o valor de m foi definido como $m = 4$, conforme sugerem New *et al.* (2000).

$$w_k = r^m \quad (7)$$

2.3.2. Inverso da distância ponderada (IDW)

O método IDW consiste na interpolação espacial de um conjunto conhecido de pontos dispersos. Os valores atribuídos aos pontos desconhecidos são calculados a partir da média ponderada pelo inverso da distância dos valores dos dados dentro de uma região (Almeida, 2017; Mendez *et al.*, 2019). Este método é caracterizado pela magnitude da potência utilizada, que geralmente varia de 1 a 3, a fim de não penalizar muito a contribuição para a estimativa de pontos distantes (Camera *et al.*, 2014). No presente estudo, todos os vizinhos foram usados no modelo (Eq. (8)).

$$E_i = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i h_i^{-p})}{\sum_{i=1}^n (h_i^{-p})} \quad (8)$$

onde h_i é a distância euclidiana entre o ponto de interesse e a localização da estação i ; e p é a potência utilizada (variando entre 1 e 3 neste estudo).

2.3.3. Krigagem Ordinária (OK)

A krigagem ordinária utiliza informações a partir de um semivariograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras com valores conhecidos que irão estimar pontos desconhecidos (Cai *et al.*, 2019; Pezzoni Filho *et al.*, 2018). A variação espacial da interpolação na krigagem é quantificada por um semivariograma, que consiste em um gráfico de dispersão da semivariância versus a distância dos pontos amostrados (Cai *et al.*, 2019). Depois de ajustado o variograma, a estatística de krigagem é feita calculando os pesos de cada localização nas proximidades do ponto a ser previsto (Lundgren *et al.*, 2017), como apresentado na Eq. (9).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [O(x_i) - O(x_i - h)]^2 \quad (9)$$

em que $\hat{\gamma}(h)$ é a semivariância; N é o número de pares de valores medidos $O(x_i)$ e $O(x_i - h)$ observados; e h é o vetor de separação de pares.

Os modelos testados foram o esférico (SPH), exponencial (EXP) e gaussiano (GAU). Os cálculos foram realizados para cada dia de forma automática utilizando a função *autofitVariogram* do pacote Automap do software R, sendo o ajuste do semivariograma avaliado pelo método dos mínimos quadrados ordinários (OLS).

2.3.4. Random Forest (RF)

As previsões finais do RF são a média das previsões de árvores individuais (Breiman, 2001; Prasad *et al.*, 2006; Biau e Scornet, 2016), em que b é a amostra de *bootstrap*

individual, B é o número total de árvores e t_b^* é o aprendiz individual, ou seja, a árvore de decisão individual (Eqs. (10)-(11)).

$$\hat{\theta}B(x) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B t_b^*(x) \quad (10)$$

$$t_b^*(x) = t(x; z_{b1}^*, \dots, z_{bk}^*) \quad (11)$$

em que z_{bk}^* ($k = 1 \dots K$) é a k enésima amostra de treinamento com pares de valores para a variável alvo (y) e co-variáveis (x): $z_{bi}^* = (x_k, y_k)$.

O RF é uma árvore de decisão, uma técnica de aprendizado de máquina (Baratto et al., 2022). Uma descrição simples seria a divisão de um grupo complexo usando os métodos mais independentes e variáveis em grupos menores e mais simples, através de métodos condicionais, que podem levar a uma solução mais fácil de ser interpretada (Zhang et al., 2012).

Funciona como uma árvore em que a raiz e cada nó interno são rotulados com uma condição, esta condição é verificada, e caso seja atendida, a árvore de decisão seguirá pelo ramo correspondente, caso contrário, por outro, iterativamente, até que a condição seja atendida e a árvore finalizada (Chen et al., 2010b). Cada folha representa uma previsão de uma solução para o problema (Zhang et al., 2012). Esta metodologia tenta encontrar uma relação entre variáveis de entrada e saída (Gharaei-Manesh et al., 2016). Ele mapeia as observações de um item para obter conclusões do seu valor alvo (Chen et al., 2010b).

Muitas variáveis de entrada que podem contribuir para a previsão são utilizadas, e em cada nó da árvore de decisão, a variável mais importante é então selecionada (Li et al., 2011).

Por ser um algoritmo baseado em dados, o RF requer apenas uma entrada limitada do usuário (Hengl et al., 2018). Nesse sentido, foram utilizadas variáveis climáticas e topográficas para permitir a decisão da árvore. Isso ocorre porque variáveis meteorológicas, como temperatura, juntamente com características topográficas, são importantes para a definição de chuvas (Chávez e Takahashi, 2017; Reboita et al., 2012). As variáveis meteorológicas (temperaturas do ar máxima e mínima, e classificação climática de Köppen-Geiger) foram obtidas do banco de dados *WorldClim*, um conjunto de camadas climáticas glo-

bais em grade, com uma resolução espacial de cerca de 1 km². O Modelo Digital de Elevação (DEM) oriundo da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) foi utilizado, obtido pela plataforma *Earth Explorer*, com uma resolução espacial de 30 m. Utilizaram-se as seguintes informações topográficas obtidas a partir do MDE: altitude, declividade, orientação das encostas, distância até o mar, índice de convergência, índice de robustez do terreno, direção de escoamento, sombreamento analítico e vetor do terreno.

Os cálculos foram realizados no ambiente R, usando o pacote *randomForest*.

2.4. Base de dados em formato *grid*

Após a avaliação dos interpoladores espaciais e escolha do interpolador com melhor desempenho, utilizando os procedimentos estatísticos demonstrados nas Eq. (1)-(3), elaborou-se uma base de dados espacializada de precipitação diária, com resolução espacial de 0,01°, compreendendo o período entre 1980 e 2018.

2.5. Comparação com outras bases de dados disponíveis

Compararam-se bases de dados de precipitação diária em formato *grid* amplamente utilizadas (Tabela 1), com a base de dados elaborada neste trabalho. Para tal avaliação calcularam-se as mesmas estatísticas descritas nas Eq. (1)-(3), de acordo com o método descrito em Schumacher et al. (2020), onde os valores de precipitação diária utilizados nas comparações foram extraídos diretamente dos *grids* das bases de dados, a partir das coordenadas geográficas referentes às estações pluviométricas.

Devido ao período comum entre todas as bases de dados em formato *grid* ser entre os anos 2007 e 2016, as comparações basearam-se neste período para que houvesse uma equidade entre as análises, evitando o benefício das bases de dados com uma série histórica maior em detrimento das demais.

3. Resultados e Discussão

3.1. Espacialização da precipitação diária

Na Fig. 2 está apresentado o percentual de dias, durante toda a série histórica, em que cada interpolador apresentou melhor desempenho, de acordo com os índices

Tabela 1 - Bases de dados de chuva diária, em formato *grid*, avaliadas no presente estudo.

Nome	Bases de dados	Série histórica	Resolução espacial	Fonte
CHIRPS	CHIRPS 2.0	1981-2020	0,05°	Funk et al. (2015)
SM2RAIN	SM2RAIN-ASCAT	2007-2020	0,25°	Brocca et al. (2014)
TRMM	TRMM/TMPA	1998-2020	0,25°	NASA (2020)
XAVIER	Xavier et al. (2015)	1980-2016	0,25°	Xavier et al. (2015)

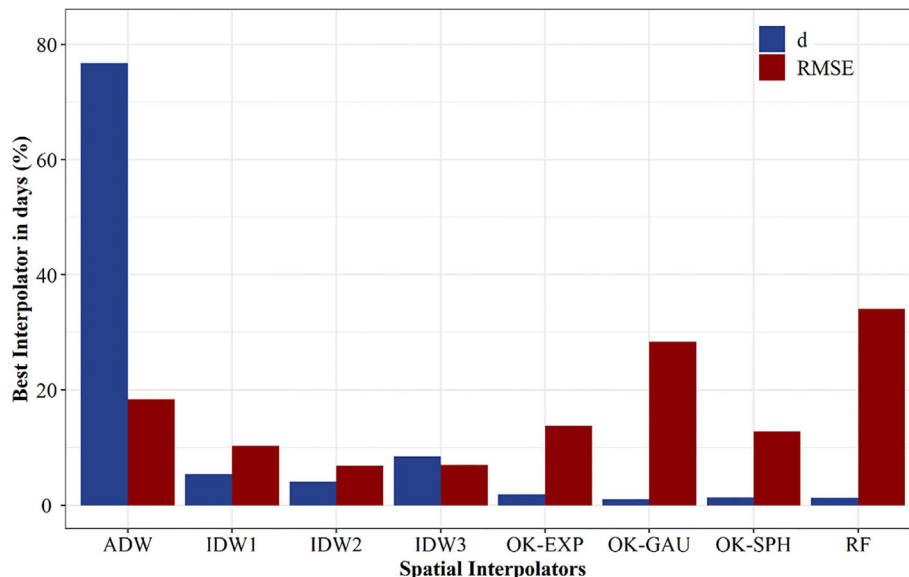


Figura 2 - Percentual dos dias em que cada interpolador apresentou o melhor desempenho para a espacialização do total precipitado diário nas bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo, de acordo com os índices *d* e *RMSE*.

estatísticos *d* e *RMSE*. Observa-se que o ADW apresentou o melhor desempenho para a espacialização dos totais pluviométricos diários na maioria absoluta dos dias, de acordo com o índice *d*. Em contrapartida, quando se observa o *RMSE*, percebe-se que o RF é o interpolador com maior destaque; contudo, conforme será descrito na sequência, o método RF apresentou estatísticas (anuais e mensais) que denotam um desempenho inferior ao ADW, permitindo inferir que o método ADW é, globalmente, melhor que os demais interpoladores.

Os valores de *RMSE* apresentaram grande variação devido à magnitude das chuvas diárias. Deste modo, o índice *RMSE* não é o mais adequado para determinar qual foi o melhor interpolador do total precipitado diário, sendo utilizado neste estudo somente para fins de comparação com outros trabalhos semelhantes na literatura (Guo *et al.*, 2020; Khouider *et al.*, 2020; Lelis *et al.*, 2018). Nesse sentido, devido ao índice *d* sempre variar entre 0 e 1, além de ser bastante utilizado para avaliar dados climáticos (precipitação) brasileiros (Saldanha *et al.*, 2015; Silva *et al.*, 2016; Tostes *et al.*, 2017), optou-se por utilizá-lo como o mais adequado para a análise de desempenho.

A partir da Tabela 2 e das Figs. 3 e 4 constatou-se que os interpoladores ADW e IDW (potências 1 a 3) obtiveram melhor desempenho na espacialização da pre-

cipitação diária nas bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo, assim como também evidenciado para a Europa (Hofstra *et al.*, 2008) e para o Brasil (Xavier *et al.*, 2016). Nota-se, ainda, que apenas os interpoladores ADW e IDW3 obtiveram valores médios de *d* superiores a 0,7 (Tabela 2), considerados bons por Pereira *et al.* (2009).

Nas Figs. 3a e 4a observa-se que os valores médios anuais e mensais da estatística *d* foram, na maior parte das vezes, superiores ao limite de 0,7 para o ADW, demonstrando, de maneira mais clara, a superioridade deste interpolador, seguido pelo IDW e finalmente pelo OK e RF.

Todos os interpoladores obtiveram valores médios de *RMSE* muito próximos (Tabela 2), os quais variaram próximos a 5 mm dia⁻¹, dentro das faixas (4,7 a 8,9 mm dia⁻¹) encontradas por Gadêlha (2018) que realizou um estudo para todo o território brasileiro considerando 4911 estações, para o ano de 2016; por Lucas *et al.* (2014), que realizaram um estudo no município de Belo Horizonte-MG considerando dados de 16 estações, para dois dias distintos do ano de 2017; e por Xavier *et al.* (2016), que realizaram um estudo para todo o território brasileiro a partir da análise de 3625 estações, considerando dados de 1980 a 2016. Esses valores significam que a precisão média é adequada e equivalente a uma chuva diária fraca, segundo Souza *et al.* (2012).

Tabela 2 - Estatísticas utilizadas para avaliação do desempenho médio geral dos interpoladores usados na espacialização dos totais precipitados diários nas bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo.

Índice estatístico	ADW	IDW1	IDW2	IDW3	OK-Exp	OK-Gau	OK-Sph	RF
<i>d</i> (adimensional)	0,77	0,68	0,70	0,71	0,56	0,50	0,49	0,53
RMSE (mm)	5,15	5,18	5,30	5,42	5,40	5,32	5,24	5,23
BIAS (mm)	0,03	0,07	0,04	0,03	0,01	-0,09	0,16	0,27

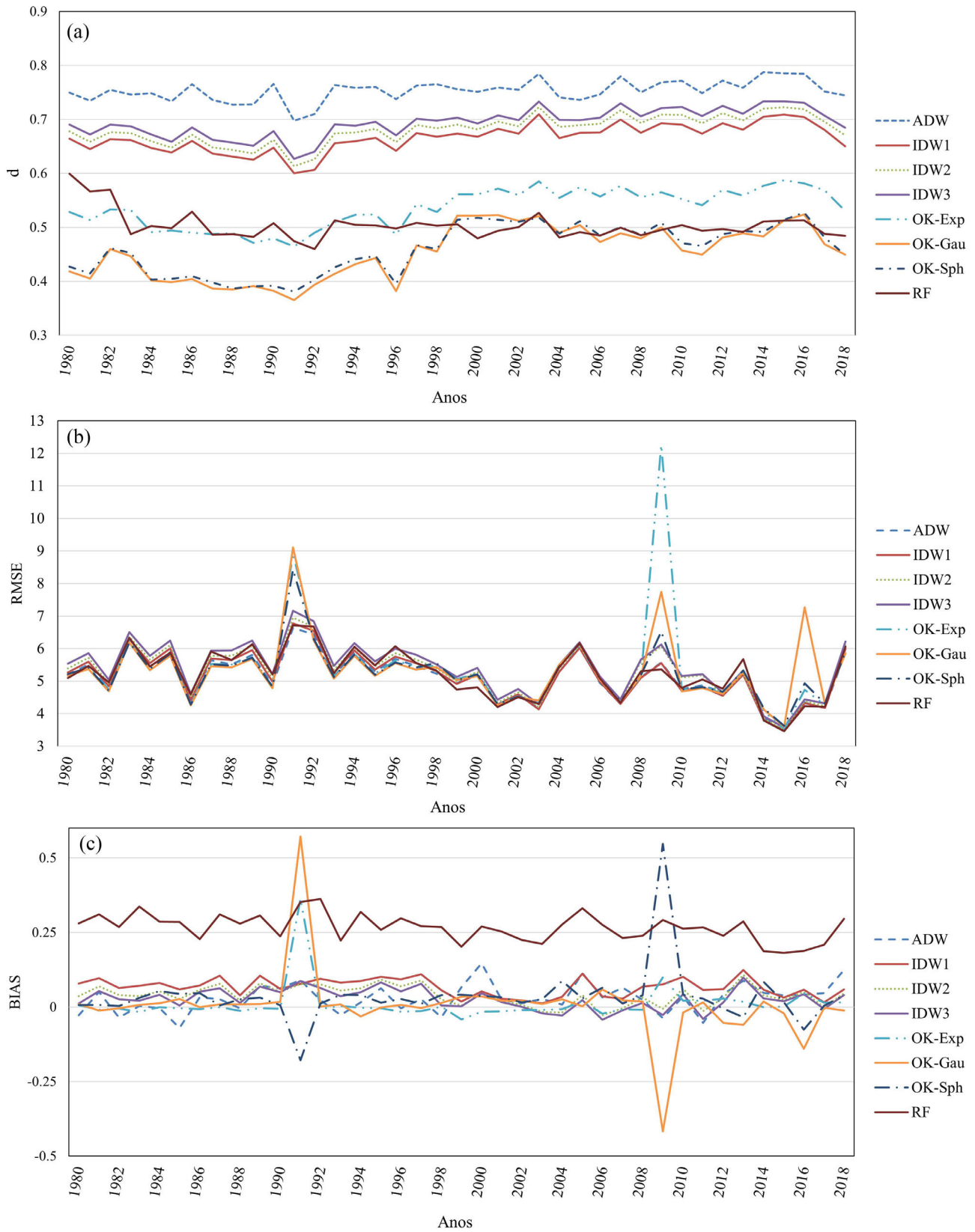


Figura 3 - Valores médios anuais das estatísticas obtidas para a interpolação do total precipitado diário nas bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo: a) *d*, b) *RMSE*, e c) *BIAS*.

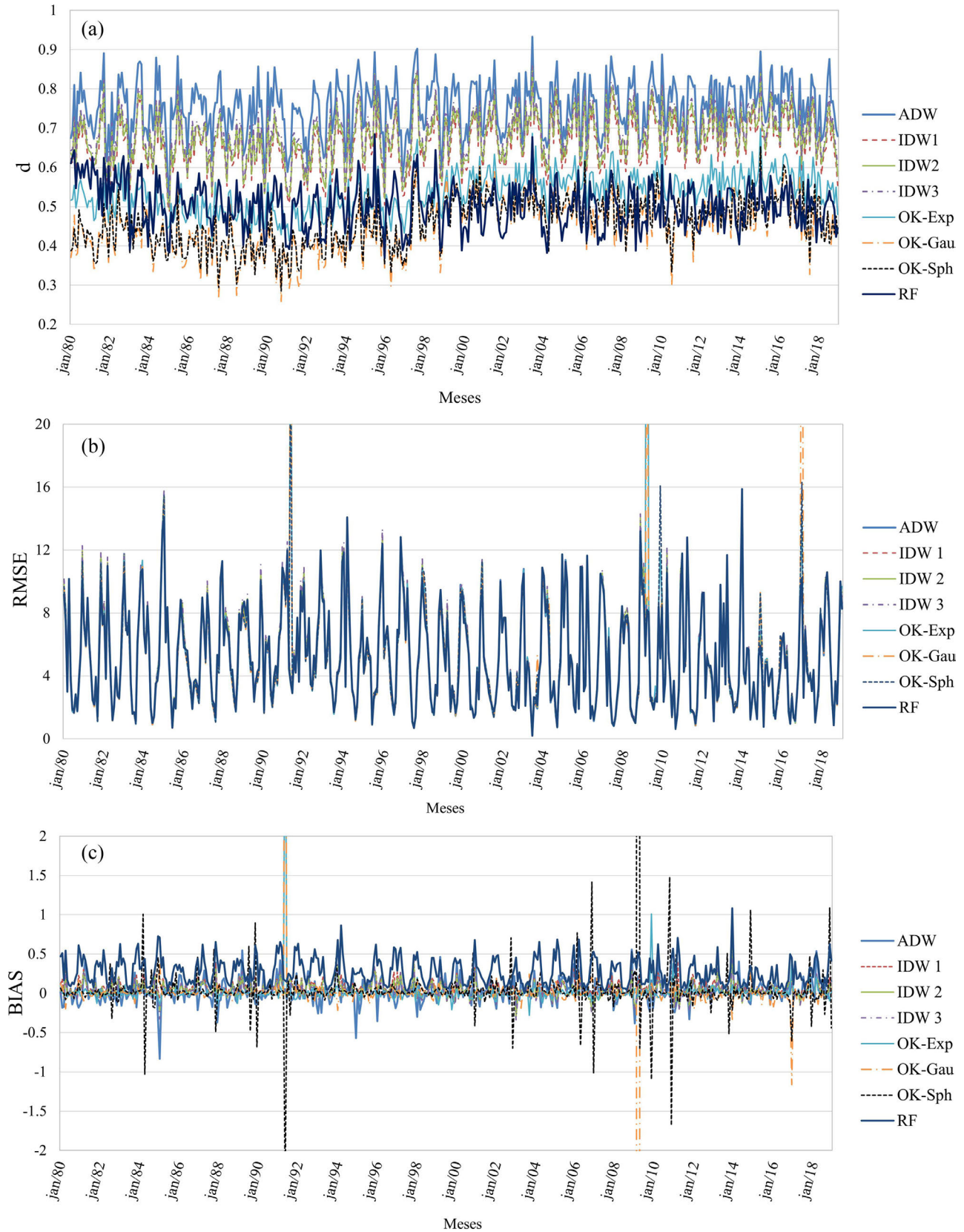


Figura 4 - Valores médios mensais das estatísticas obtidas para a interpolação do total precipitado diário nas bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo: a) *d*, b) *RMSE*, e c) *BIAS*.

A proximidade entre os valores de *RMSE* obtidos pelos diversos interpoladores pode ser constatada a partir das *Figs. 3b* e *4b*, o que demonstra a dificuldade de identificar qual o melhor interpolador a partir da aplicação exclusiva deste índice, conforme também relatado por *Portalés et al. (2010)* e *Wang et al. (2014)*. Ambas as figuras demonstram ainda que, durante alguns períodos (anos de 1991 e de 2009, por exemplo), apenas os interpoladores OK e RF apresentaram valores de *RMSE* bem superiores aos demais interpoladores, denotando, para tais períodos, maiores erros de estimativa da precipitação diária. Isto pode ter sido ocasionado por algumas chuvas consideravelmente altas em certas regiões, medidas por poucas estações, durante os meses de inverno, onde todas as demais regiões da área em estudo tiveram valores baixos ou nulos de precipitação diária, dificultando uma representação mais realística da precipitação pelos métodos OK e RF.

Os valores absolutos de *BIAS* (*Tabela 2*) não demonstraram diferenças expressivas entre os interpoladores avaliados uma vez que os resultados, em mm dia⁻¹, foram semelhantes. De modo geral, as predições subestimaram os dados amostrais (*BIAS* positivo), com exceção da OK (gaussiana). Semelhante ao *RMSE*, os *BIAS* apresentados nas *Figs. 3c* e *4c* demonstram dificuldade em eleger, a partir do gráfico, qual foi o melhor interpolador, pois a maioria dos valores variaram dentro da mesma faixa. A exceção foi o RF, o qual tendeu a apresentar maiores *BIAS* e, conseqüentemente, maiores subestimativas das chuvas diárias. Na maior parte dos dias, os valores de *BIAS* variaram entre -0,1 e +0,1, valores semelhantes aos observados por *Wagner et al. (2012)*. Assim como evidenciado para o *RMSE*, os valores de *BIAS* para OK e RF, nos anos de 1991 e 2009, foram superiores aos dos demais interpoladores.

A *Fig. 4* mostra que nos meses de inverno há uma diminuição dos erros de estimativa comparativamente aos meses de verão. Esse comportamento pode estar relacionado à sazonalidade meteorológica, devido às lâminas precipitadas diárias serem menores e com menor variabilidade espacial no inverno, conseqüentemente diminuindo a magnitude dos erros. Este comportamento é comum em análises de dados diários, principalmente de chuva (*Hofstra et al., 2008; Wüest et al., 2010; Yang et al., 2019*). No Estado do Espírito Santo há concentração de chuvas no verão (*Cheval et al., 2011; Mello et al., 2012*), período em que há maiores lâminas precipitadas, associadas a uma maior variabilidade espacial, especialmente devido às chuvas convectivas, as quais são mais difíceis de serem adequadamente representadas por meio de interpolação espacial (*Shen et al., 2001*). Além disso, os erros são menores no inverno devido à uma grande quantidade de observações de precipitação iguais a zero, fazendo com que as predições nesses meses sejam de pequena magnitude, conseqüentemente, diminuindo a diferença entre os valores estimados e observados.

Nas *Figs. 5* e *6* são apresentados os gráficos de dispersão (valores observados vs. valores estimados) de todos os interpoladores para os meses de janeiro de todos os anos e, para os meses de julho de todos os anos, respectivamente. A apresentação dos gráficos em períodos distintos foi adotada somente para fins de comparação do período chuvoso (janeiro) com o período de estiagem (julho).

Nos gráficos de dispersão apresentados nas *Figs. 5* (verão) e *6* (inverno), observa-se que não houve um ajuste adequado entre os valores observados e estimados. Porém, este comportamento já era esperado, semelhantemente aos resultados encontrados por *Yang et al. (2019)* e *Bozzini e Mello Junior (2020)*, estando associado à grande variabilidade espaço-temporal de eventos hidrológicos aleatórios, como a chuva diária (*Hartmann et al., 2011; Sanches et al., 2013*). Todavia, apesar desta limitação, os dados diários de precipitação obtidos através da espacialização são úteis para diversas aplicações, incluindo a detecção de mudanças climáticas (*Salviano et al., 2016; Trenberth, 2011*) e estudo de inundações (*Madsen et al., 2014; Schumacher, 2016*), na modelagem hidrológica, em especial no manejo integrado de bacias hidrográficas (*Romero e Ortiz, 2008; Tundisi, 2008*), além possibilitar a compreensão de como o clima interage com os processos terrestres, hidrológicos e biogeoquímicos (*Hofstra et al., 2008*), entre outros.

Ainda nas *Figs. 5* e *6*, pode-se observar que o valor calculado pelos métodos OK e RF apresenta menor amplitude entre os valores máximos e mínimos que os demais métodos, pois ambos os métodos representaram a variação de valores estimados entre 0 e 150 mm dia⁻¹; todavia, os dados observados variam entre 0 a 200 mm dia⁻¹, como foi corretamente expresso no método ADW. Isso ocorre porque os métodos OK e RF suavizam os valores reais da variável, buscando a variância mínima (*Cressie, 1983*), o que promove uma maior homogeneidade da superfície. Nesse sentido, a suavização também é responsável pelo comportamento dos resultados encontrados nas *Figs. 3* e *4*. Os efeitos de suavização levam os valores pequenos a serem superestimados e os valores grandes a serem subestimados (*Yamamoto, 2005*). Ademais, a suavização causa a perda dos valores originais (medidos), tornando estes métodos não recomendados para determinadas aplicações, como por exemplo o estudo de chuvas extremas, estimativa de erosão e de escoamento superficial, em especial no planejamento ambiental e hidrológico.

Nas *Figs. 7* e *8* estão apresentados os resultados das espacializações da precipitação nas bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo, para um dia de muita chuva (09 de novembro), e para um dia de pouca chuva (01 de agosto) no ano de 2018, respectivamente.

Na *Fig. 7* observam-se semelhanças entre alguns interpoladores em um dia típico de verão. O ADW e o IDW apresentam uma fraca suavização das chuvas, diferente-

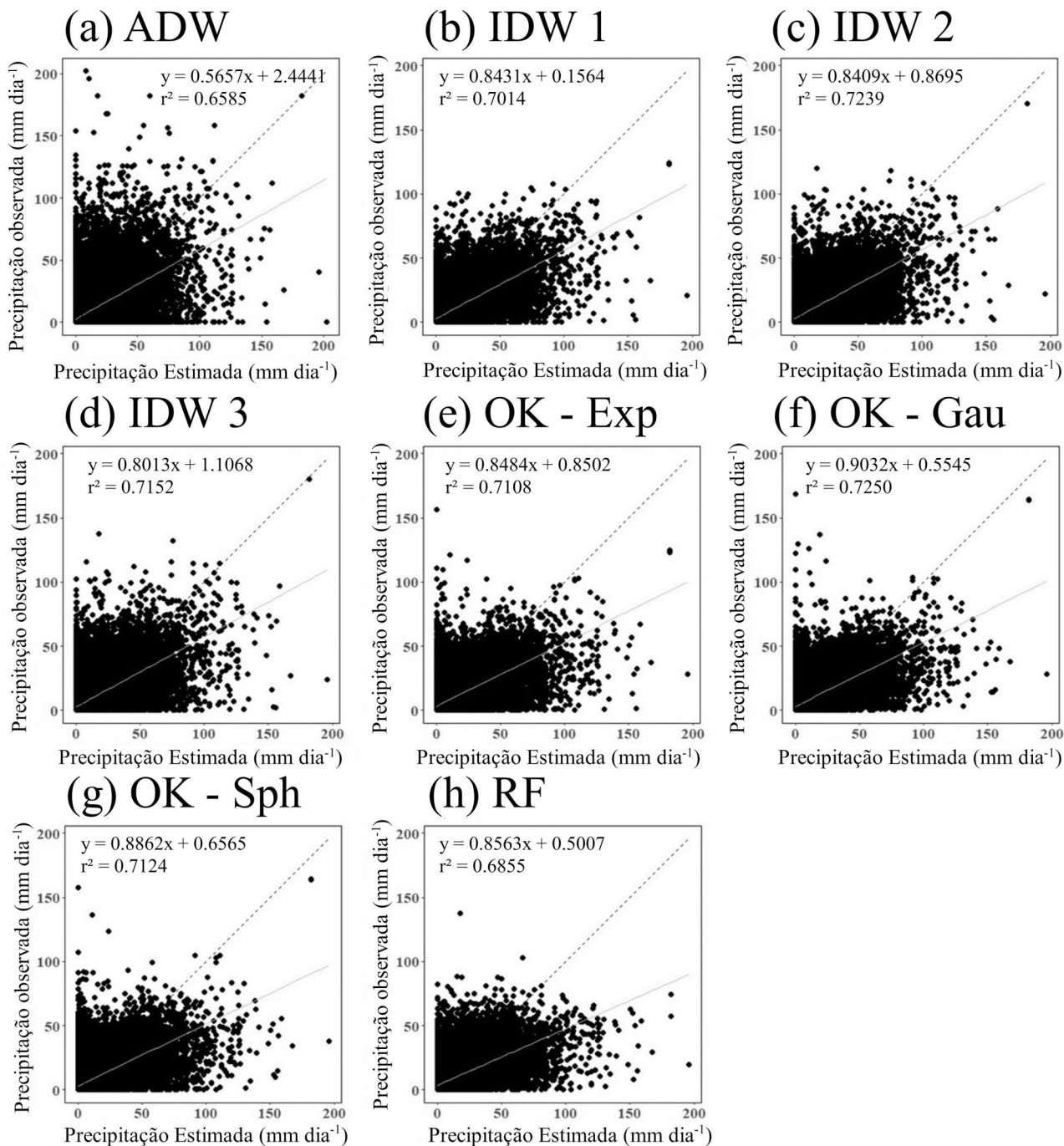


Figura 5 - Gráfico de dispersão da precipitação diária observada e interpolada para as bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo no mês de janeiro (verão), considerando todos os anos da série histórica utilizada.

mente dos demais métodos, explicitando sua superioridade na representação de chuvas diárias. Isto porque quanto menor a escala temporal, mais heterogênea (abrupta) será a representação espacial das chuvas, uma vez que a precipitação é um fenômeno com grande variabilidade espaço-temporal (Nery *et al.*, 2017; Nunes *et al.*, 2018; Shi *et al.*, 2014), em especial devido aos eventos convectivos, comuns no verão. A maior suavização decorrente da

OK e do RF deixou os mapas visualmente mais homogêneos. Essa maior suavização da superfície de resposta também foi relatada em outras pesquisas (Yamamoto, 2005; Zhu, 2013), as quais alertam para um problema decorrente: subestimativa dos grandes valores (chuvas intensas). Esta subestimativa é prejudicial, por exemplo, para a modelagem chuva-vazão, pois podem estar apresentando uma precipitação acumulada não real, baseada na média

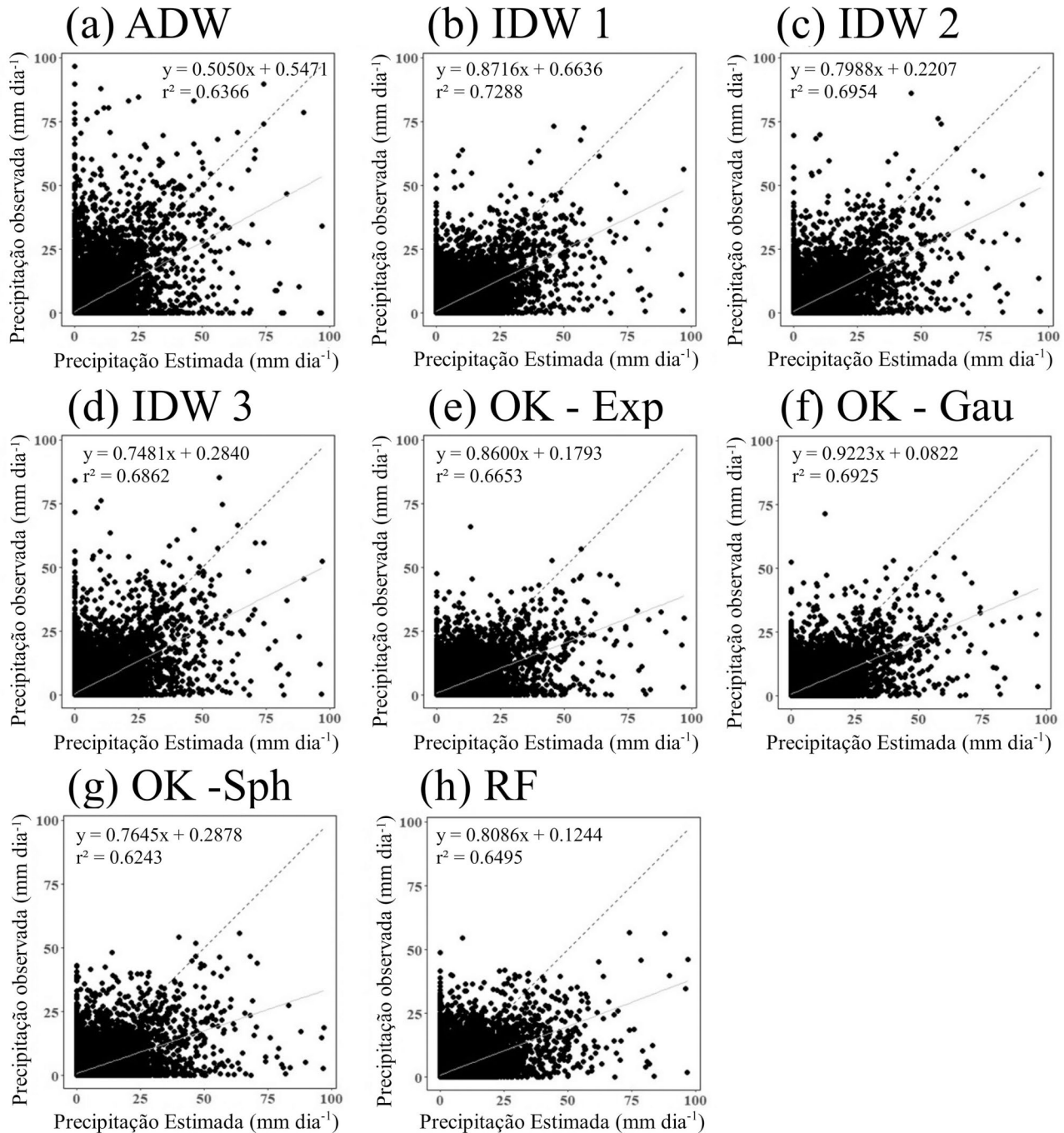


Figura 6 - Gráfico de dispersão da precipitação diária observada e interpolada para as bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo no mês de julho (inverno), considerando todos os anos da série histórica utilizada.

encontrada na área em estudo, não havendo uma nítida distinção entre as áreas com altos e baixos índices pluviométricos (Cunha *et al.*, 2014; Sousa *et al.*, 2010). Os resultados serão valores de vazão também subestimados, os quais são indesejáveis para aplicações em dimensionamento de obras hidráulicas de engenharia, como obras de barragens e drenagem urbana (Batista e Boldrin, 2018; Souza-Cruz-Buenaga *et al.*, 2019).

A partir dos mapas apresentados na Fig. 8 observou-se que todos os interpoladores possuem um desempenho semelhante, considerado bom, para dias com pouca chuva. Desta forma, reforçam-se as análises realizadas sobre a Fig. 3, quando se afirmou que, para a área em estudo, os interpoladores apresentam melhores resultados no inverno. Esta afirmação coincide com outros estudos, cujas regiões também apresentam índices pluviométricos menores

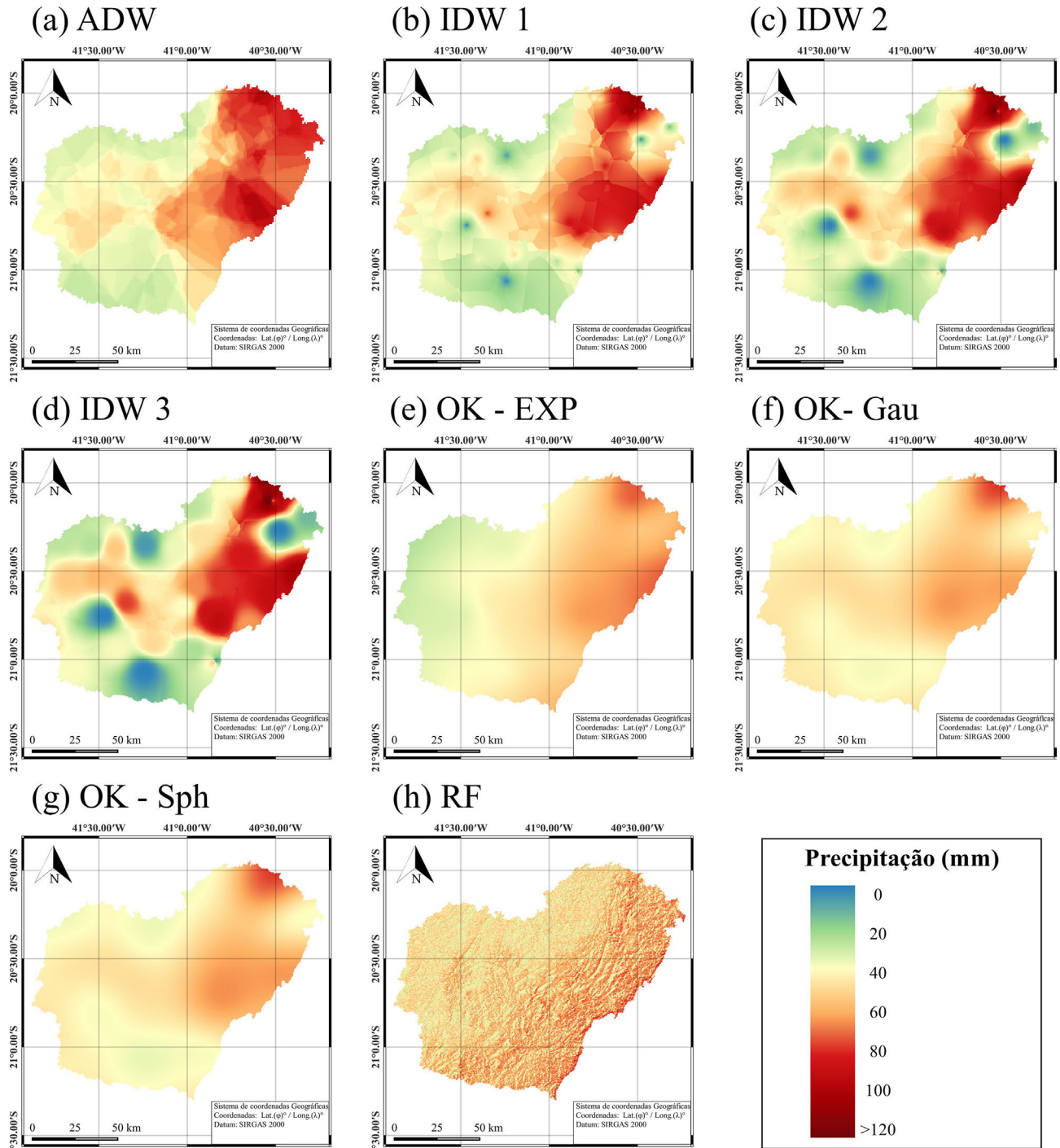


Figura 7 - Resultados das espacializações da precipitação diária nas bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo em 09/11/2018, por todos os métodos de interpolação avaliados.

no inverno e maiores no verão (Chen *et al.*, 2010a; Xavier *et al.*, 2015). Nesse sentido, pode-se dizer que para dias pouco chuvosos qualquer interpolador espacial utilizado no presente trabalho pode ser utilizado, principalmente para estudos referentes à disponibilidade hídrica do solo (Guerra *et al.*, 2013; Sales *et al.*, 2017).

Finalmente, a análise em conjunto das Figs. 2 a 8 e da Tabela 2, possibilita eleger o ADW como o melhor interpolador da precipitação diária nas bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo. Desta forma, para a criação da base de dados em formato *grid*, neste trabalho, utilizou-se o interpolador ADW. Os melhores resul-

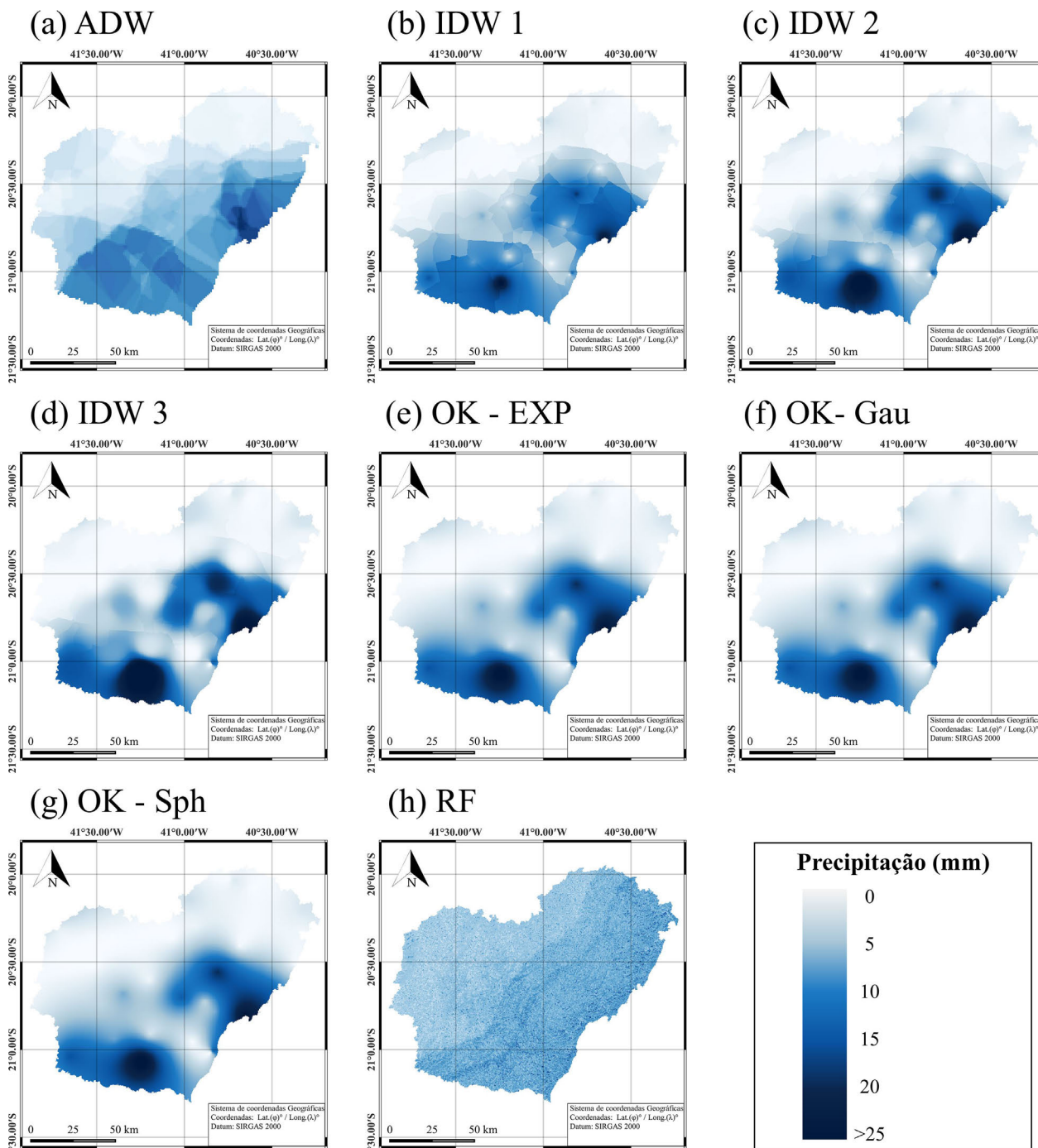


Figura 8 - Resultados das espacializações da precipitação diária nas bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo em 01/08/2018, por todos os métodos de interpolação avaliados.

tados do ADW podem estar relacionados ao fato de que este método não pode extrapolar a magnitude do valor mais alto ou mais baixo nos pontos de dados contribuintes e, portanto, não está sujeito a ultrapassar os mesmos (New *et al.* 2000). Outro fator importante no método ADW, que o diferencia dos demais, é a sua simplicidade, semelhante ao IDW.

A superioridade do ADW também ocorre devido às características intrínsecas desse método, como a consideração do raio de influência, usado na interpolação, que varia em função da densidade do conjunto de pontos observacionais, cuja distância é definida pelos CDDs. Desta forma, este raio de influência pode aumentar em áreas onde a variabilidade espacial das estações é alta, e

diminuir onde a variabilidade é menor (New *et al.*, 2000), consequentemente utilizando valores reais e, que, muitas vezes, possuem alta correlação.

3.2. Base de dados de precipitação diária em formato *grid*

A partir da aplicação do método com melhor desempenho (ADW), foi criada e disponibilizada uma base de dados contendo os mapas de precipitação diária nas bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo, com as especificações técnicas apresentadas na Tabela 3. A base de dados “Precipitation” está disponibilizada na plataforma indexada Mendeley Data.

3.3. Comparação entre bases de dados de precipitação diária

A Tabela 4 apresenta os resultados estatísticos (*BIAS*, *d* e *RMSE*) da comparação entre bases de dados em formato *grid*, conforme metodologia descrita em Schumacher *et al.* (2020). A Fig. 9 demonstra as médias mensais para o período em análise (2007-2016), obtidas na comparação das bases de dados, utilizando o interpolador ADW.

Nota-se, na Tabela 4 e na Fig. 9, que a base de dados obtida neste trabalho (denominada base ADW) e a de XAVIER (Xavier *et al.*, 2015) apresentaram performance de estimativa dos totais pluviométricos diários superior às demais. Na Fig. 9a, observa-se que as bases de dados ADW e XAVIER foram as que mais se destacaram, com *d* sempre superior a 0,8, seguidas de CHIRPS, TRMM e SM2RAIN. Contudo, estes resultados demonstram que ADW, XAVIER e CHIRPS tem um desempenho considerado bom para o índice *d* ($>0,70$), uma vez que, quanto mais próximos de 1 os valores de *d*, maior é a concordância entre os valores estimados e observados (Tostes *et al.*, 2017).

Já na Fig. 9b, observa-se que, novamente, as bases ADW e XAVIER encontram-se visualmente sobrepostas, seguidas por SM2RAIN, TRMM e CHIRPS. A base de dados CHIRPS é a que apresenta maior variação entre os valores máximos e mínimos de *RMSE*. A partir da análise visual dos valores obtidos para *RMSE*, constata-se que todas as bases de dados se encontram dentro dos valores esperados para o Brasil (4,7 a 8,9 mm dia⁻¹), encontrados por Gadêlha (2018) e Lucas *et al.* (2014). Por fim, a Fig. 9c demonstra que o TRMM foi a base com maior variação absoluta entre os valores mínimos e máximos de *BIAS*.

A Fig. 9 também demonstra que nos meses de inverno, os picos mínimos do *RMSE* são menores, demonstran-

Tabela 4 - Resultados estatísticos da comparação das bases de dados utilizadas neste estudo.

Índice estatístico	ADW	CHIRPS	SM2RAIN	TRMM	XAVIER
<i>d</i> (adimensional)	0,87	0,73	0,67	0,67	0,84
RMSE (mm)	3,77	7,07	5,67	8,65	3,78
BIAS (mm)	0,05	-0,30	-0,24	-0,17	0,04

do uma nítida diminuição deste erro. Isto está relacionado à sazonalidade da chuva no sul do Espírito Santo, já apresentadas neste trabalho (Hofstra *et al.*, 2008; Wüest *et al.*, 2010; Yang *et al.*, 2019). Ou seja, tanto as interpolações quanto as bases de dados obtidas por satélites estão sujeitas à sazonalidade das amostras, fazendo com que, de forma geral, todas as bases de dados consigam representar melhor os eventos de precipitação nos meses mais secos (inverno), em comparação aos meses de verão, devido às flutuações da velocidade do vento e temperatura do ar, na área em estudo, onde há concentração de chuvas no verão (Cheval *et al.*, 2011; Mello *et al.*, 2012).

A tendência do melhor desempenho das bases ADW e XAVIER está relacionada à semelhança do método de elaboração de ambas as bases de dados, que espacializaram dados pontuais medidos diretamente em estações pluviométricas (da ANA), e utilizaram o mesmo interpolador espacial. Todavia, a maior diferença entre a base de dados ADW e XAVIER é a resolução espacial, onde a base ADW possui uma resolução de 0,01°, apresentando um nível de detalhamento maior que às demais bases de dados. Devido às bases de dados CHIRPS, SM2RAIN e TRMM serem produtos de sensoriamento remoto, que estimam a chuva com base em observações de diferentes variáveis medidas por satélites e não por espacialização de medições pontuais (Brocca *et al.*, 2014; Funk *et al.*, 2015; NASA, 2020), houve esta diferença entre os resultados destas bases e as bases ADW e XAVIER. Contudo, isso não significa que estas bases de dados são inferiores, ou até mesmo inadequadas, pois o índice *d* obtidos pelas mesmas foi muito próximo ou superior a 0,7. Ressalta-se que estas bases são amplamente utilizadas na atualidade para diversos estudos (Amini *et al.*, 2019; Ciabatta *et al.*, 2018; Jalilvand *et al.*, 2018; Jesús *et al.*, 2016; Massari *et al.*, 2018; Paca *et al.*, 2020; Rivera *et al.*, 2019; Young-Sik *et al.*, 2019; Yuan *et al.*, 2019), em especial quando há indisponibilidade de dados medidos em estações meteorológicas.

4. Conclusões

Baseado na ausência de dados meteorológicos pontuais, disponíveis em escalas regionais, o presente trabalho

Tabela 3 - Especificações da base de dados de precipitação diária nas bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo gerada no presente estudo.

Formato	Série histórica	Escala temporal	Resolução espacial	Datum	SCR (Código EPSG)
GeoTIFF	1980-2018	Diária	0,01°	SIRGAS 2000	31984

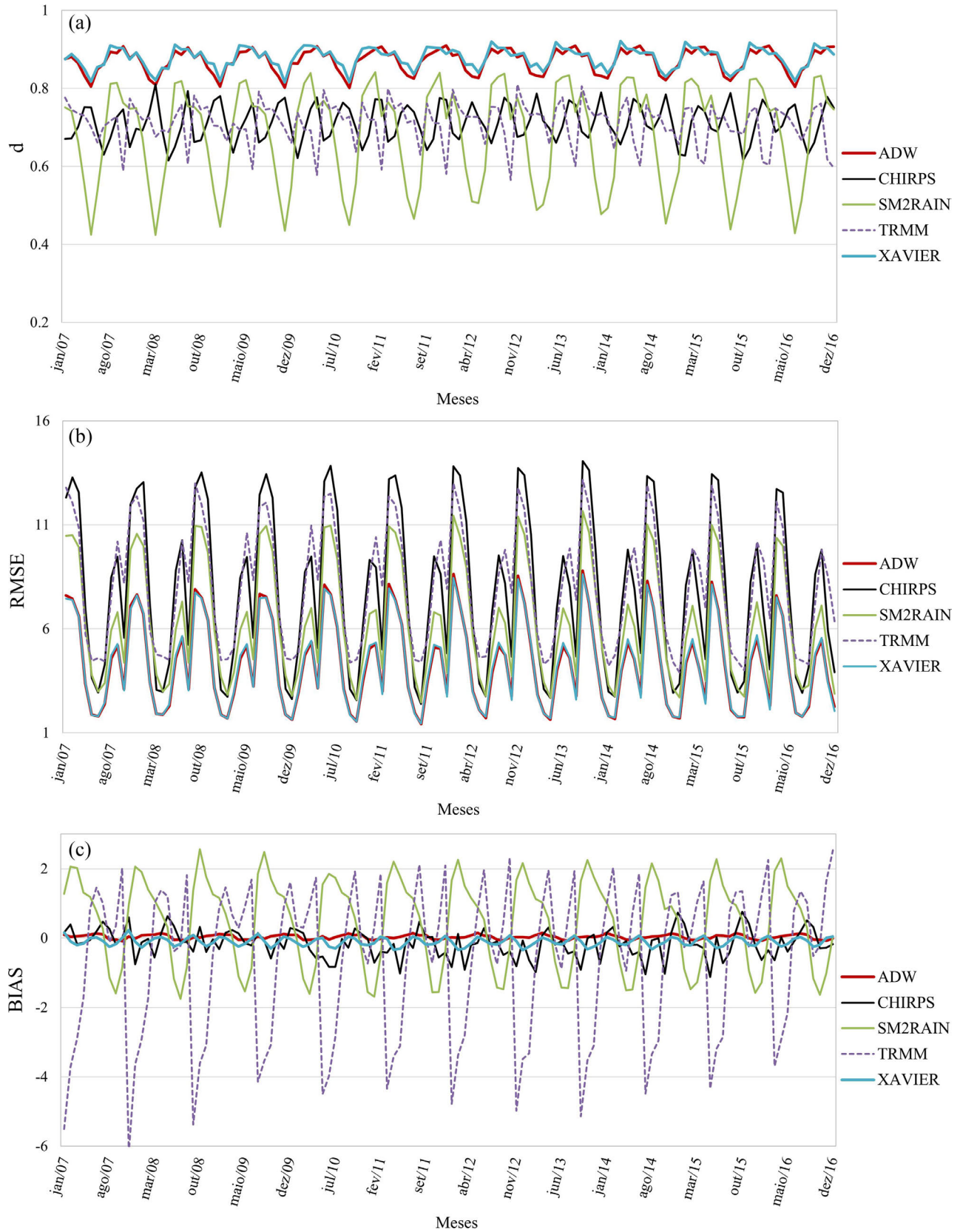


Figura 9 - Estatísticas médias mensais do total precipitado diário, para as bases de dados em formato *grid* nas bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo: a) *d*, b) *RMSE* e c) *BIAS*.

alcança seu objetivo geral, por meio de espacializações da precipitação pluvial diária, na região sul do Espírito Santo, entre os anos (1980-2020).

Ademais, o trabalho também alcança seus objetivos específicos, primeiramente, determinando a Distância Angular Ponderada (ADW) como o melhor método de espacialização da precipitação diária, para a área em estudo, com base em análises estatísticas e visuais de diferentes interpoladores espaciais, dentre eles, o Inverso da Distância Ponderada (IDW), a Krigagem Ordinária (OK) e o *Random Forest* (RF); na sequência, criando uma base de dados em formato *raster*, a partir do melhor método de espacialização (ADW); por fim, determinando com auxílio de métricas estatísticas, que o método ADW possui maior capacidade de representação da precipitação diária no sul do Espírito Santo, do que outras bases de dados disponíveis em formato *raster*, com cobertura nacional (XAVIER) e global (CHIRPS, SM2RAIN e TRMM).

A base de dados de precipitação diária criada pelo método de espacialização ADW, possui resolução espacial de 0,01° (equivalente à 1,24 km²) e série histórica (1980-2020). Além disso, cobre as bacias hidrográficas do sul do estado do Espírito Santo, situadas no bioma Mata Atlântica. A base de dados *Precipitation* está disponibilizada na plataforma indexada Mendeley Data.

Por fim, diante do exposto no presente trabalho, é possível concluir que a criação de bases meteorológicas por meio de espacialização, em escalas regionais, é uma alternativa promissora à ausência de estações de campo e falhas nas séries históricas. Ademais, há espaço para trabalhos futuros, que abordem diferentes métodos de espacialização e criação de novas bases de dados regionais, principalmente devido à chuva possuir grande variabilidade espaço-temporal, sendo interessante explorar as particularidades dos diferentes climas encontrados em cada região do Brasil.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001, e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

- AGERH, Agência Estadual de Recursos Hídricos. **Comitês de Bacias Hidrográficas**. Disponível em <https://agerh.es.gov.br/documentos-dos-comites>, acesso em 20 mai. 2020.
- ALMEIDA, C.T.; DELGADO, R.C.; OLIVEIRA JUNIOR, J.F.; GOIS, G.; CAVALCANTI, A.S. Avaliação das estimativas de precipitação do produto 3B43-TRMM do Estado do Amazonas. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 3, p. 279-286, 2015. doi
- ALMEIDA, L.T. de. **Espacialização de Chuvas Intensas: Uma Nova Proposta**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, 2017.
- ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014. doi
- AMINI, A.; ABDEH KOLAHCHI, A.; AL-ANSARI, N.; KARAMI MOGHADAM, M.; MOHAMMAD, T. Application of TRMM precipitation data to evaluate drought and its effects on water resources instability. **Applied Sciences**, v. 9, n. 24, p. 1-18, 2019. doi
- ASLAMI, F.; GHORBANI, A.; SOBHANI, B.; ESMALI, A. Comprehensive comparison of daily IMERG and GSMaP satellite precipitation products in Ardabil Province, Iran. **International Journal of Remote Sensing**, v. 40, n. 8, p. 3139-3153, 2019. doi
- BARATTO, P.F.B.; CECÍLIO, R.A.; TEIXEIRA, D.B.S.; ZANETTI, S.S.; XAVIER, A.C. Random forest for spatialization of daily evapotranspiration (ET₀) in watersheds in the Atlantic Forest. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 449, p. 1-19, 2022. doi
- BATISTA, J.A. do N.; BOLDRIN, A.J. Avaliação do desempenho hidráulico de um sistema de drenagem de águas pluviais urbanas. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 23, n. 2, p. 263-273, 2018. doi
- BIAU, G.; SCORNET, E. A random forest guided tour. **TEST**, v. 25, n. 2, p. 197-227, 2016. doi
- BIER, A.A.; FERRAZ, S.E.T. Comparação de Metodologias de Preenchimento de Falhas em Dados Meteorológicos para Estações no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 215-226, 2017. doi
- BOZZINI, P.L.; MELLO JUNIOR, A.V. Previsões de precipitação de modelos atmosféricos como subsídio à operação de sistemas de reservatórios. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, n. 1, p. 99-109, 2020. doi
- BREIMAN, L. Random forests. **Machine Learning**, v. 45, n. 1, p. 5-32, 2001. doi
- BROCCA, L.; CIABATTA, L.; MASSARI, C.; MORAMARCO, T.; HAHN, S. *et al.* Soil as a natural rain gauge: Estimating global rainfall from satellite soil moisture data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, n. 9, p. 5128-5141, 2014. doi
- CAI, X.; WANG, X.; JAIN, P.; FLANNIGAN, M.D. Evaluation of gridded precipitation data and interpolation methods for forest fire danger rating in Alberta, Canada. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 124, n. 1, p. 3-17, 2019. doi
- CAMERA, C.; BRUGGEMAN, A.; HADJINICOLAOU, P.; PASHIARDIS, S.; LANGE, M.A. Evaluation of interpolation techniques for the creation of gridded daily precipitation (1 × 1 km²); Cyprus, 1980-2010. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 119, n. 2, p. 693-712, 2014. doi
- CECCHERINI, G.; AMEZTOY, I.; HERNÁNDEZ, C.P.R.; MORENO, C.C. High-Resolution precipitation datasets in South America and West Africa based on Satellite-Derived rainfall, enhanced vegetation index and Digital Elevation Model. **Remote Sensing**, v. 7, n. 5, p. 6454-6488, 2015. doi

- CHAVEZ, S.P.; TAKAHASHI, K. Orographic rainfall hot spots in the Andes-Amazon transition according to the TRMM precipitation radar and in situ data. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 122, n. 11, p. 5870-5882, 2017. doi
- CHEN, D.; OU, T.; GONG, L.; XU, C.-Y.; LI, W. *et al.* Spatial interpolation of daily precipitation in China: 1951-2005. **Advances in Atmospheric Sciences**, v. 27, n. 6, p. 1221-1232, 2010a. doi
- CHEN, H.Y.; HOU, T.W.; CHUANG, C.H. Applying data mining to explore the risk factors of parenting stress. **Expert Systems with Applications**, v. 37, v. 1, p. 598-601, 2010b. doi
- CHEN, T.; REN, L.; YUAN, F.; YANG, X.; JIANG, S. *et al.* Comparison of Spatial Interpolation Schemes for Rainfall Data and Application in Hydrological Modeling. **Water**, v. 9, n. 342, p. 1-18, 2017. doi
- CHEVAL, S.; BACIU, M.; DUMITRESCU, A.; BREZA, T.; LEGATES, D.R. *et al.* Climatologic adjustments to monthly precipitation in Romania. **International Journal of Climatology**, v. 31, n. 5, p. 704-714, 2011. doi
- CIABATTA, L.; MASSARI, C.; BROCCA, L.; GRUBER, A.; REIMER, C. *et al.* SM2RAIN-CCI: a new global long-term rainfall data set derived from ESA CCI soil moisture. **Earth System Science Data**, v. 10, n. 1, p. 267-280, 2018. doi
- CRESSIE, N. Kriging Nonstationary Data. **Journal of the American Statistical Association**, v. 81, n. 395, p. 625-634, 1983. doi
- CUNHA, A.C.; VILHENA, J.E. de S.; SANTOS, E.S.; SARAIVA, J.M.B.; KUHN, P.A.F. *et al.* Evento extremo de chuva-vazão na bacia hidrográfica do rio Araguaí, Amapá, Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, p. 95-110, 2014. doi
- DARAND, M.; AMANOLLAHI, J.; ZANDKARIMI, S. Evaluation of the performance of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) estimation over Iran. **Atmospheric Research**, v. 190, p. 121-127, 2017. doi
- FALCK, A.S.; VILA, D.; TOMASELLA, J.; MAGGIONI, V.; DINIZ, F.L.R. Avaliação de um Modelo Estocástico de Erro Multidimensional Aplicado a Estimativas de Precipitação por Satélite. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 52-63, 2016. doi
- FARACO, M.A.; URIBE-OPAZO, M.A.; SILVA, E.A.A.; JOHANN, J.A.; BORSSOI, J.A. Seleção de modelos de variabilidade espacial para elaboração de mapas temáticos de atributos físicos do solo e produtividade da soja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 2, p. 463-476, 2008. doi
- FUNK, C.; PETERSON, P.; LANDSFELD, M.; PEDREROS, D.; VERDIN, J. *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. **Scientific Data**, v. 2, n. 1, p. 1-21, 2015. doi
- GADÊLHA, A.N. **Análise da missão GPM (Global Precipitation Measurement) na estimativa da precipitação sobre território brasileiro**. Dissertação de Mestrado, Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, 2018.
- GHARAEI-MANESH, S.; FATHZADEH, A.; TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R. Comparison of artificial neural network and decision tree models in estimating spatial distribution of snow depth in a semi-arid region of Iran. **Cold Regions Science and Technology**, v. 122, p. 26-35, 2016. doi
- GUERRA, V.; MOREIRA, V.; PEDROSO, D.; ROBERTI, D.R.; FERRAZ, S.E.T. *et al.* Análise das componentes hídricas, precipitação, evapotranspiração e umidade na superfície do solo representadas pelo Modelo Climático Regional Regcm3, para uma região de cultivo de soja. **Ciência e Natura**, v. 35, p. 452-454, 2013. doi
- GUO, B.; ZHANG, J.; MENG, X.; XU, T.; SONG, Y. Long-term spatio-temporal precipitation variations in China with precipitation surface interpolated by ANUSPLIN. **Scientific Reports**, v. 10, n. 81, p. 1-17, 2020. doi
- HALLAK, R.; PEREIRA FILHO, A.J. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na Região Metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com os esquemas de advecção e assimilação de dados. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 591-608, 2011. doi
- HARTMANN, M.; MOALA, F.A.; MENDONÇA, M.A. Estudo das precipitações máximas anuais em Presidente Prudente. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 4, p. 561-568, 2011. doi
- HE, X.; CHANEY, N.W.; SCHLEISS, M.; SHEFFIELD, J. Spatial downscaling of precipitation using adaptable random forests. **Water Resources Research**, v. 52, n. 10, p. 8217-8237, 2016. doi
- HENGL, T.; NUSSBAUM, M.; WRIGHT, M.N.; HEUVELINK, G.B.M.; GRÄLER, B. Random Forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables. **Peer J**, v. 6, p. 1-49, 2018. doi
- HOFSTRA, N.; HAYLOCK, M.; NEW, M.; JONES, P.; FREI, C. Comparison of six methods for the interpolation of daily, European climate data. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, p. 1-19, 2008. doi
- HOFSTRA, N.; NEW, M. Spatial variability in correlation decay distance and influence on angular-distance weighting interpolation of daily precipitation over Europe. **International Journal of Climatology**, v. 29, n. 12, p. 1872-1880, 2009. doi
- JALILVAND, E.; TAJRISHY, M.; BROCCA, L.; MASSARI, C.; GHAZI ZADEH HASHEMI, S.A. *et al.* Estimating the drainage rate from surface soil moisture drydowns: Application of DfD model to in situ soil moisture data. **Journal of Hydrology**, v. 565, p. 489-501, 2018. doi
- JESÚS, A.; BREÑA-NARANJO, J.; PEDROZO-ACUÑA, A.; ALCOCER YAMANAKA, V. The use of TRMM 3B42 product for drought monitoring in Mexico. **Water**, v. 8, n. 325, p. 1-18, 2016. doi
- JESUS, J.B.; ROSA, C.N.; BARRETO, I.D. de C.; FERNANDES, M.M. Análise da incidência temporal, espacial e de tendência de fogo nos biomas e unidades de conservação do Brasil. **Ciência Florestal**, v. 30, n. 1, p. 176-191, 2020. doi
- KHOUIDER, B.; SABEERALI, C.T.; AJAYAMOHAN, R.S.; PRAVEEN, V.; MAJDA, A.J. *et al.* A Novel Method for interpolating daily station rainfall data using a stochastic lattice model. **Journal of Hydrometeorology**, v. 21, n. 5, p. 909-933, 2020. doi

- LELIS, L.C.S.; BOSQUILIA, R.W.D.; DUARTE, S.N. Assessment of precipitation data generated by GPM and TRMM Satellites. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 33, n. 1, p. 153-163, 2018. doi
- LI, J.; HEAP, A.D.; POTTER, A.; DANIELL, J.J. Application of machine learning methods to spatial interpolation of environmental variables. **Environmental Modelling e Software**, v. 26, n. 12, p. 1647-1659, 2011. doi
- LUCAS, T.P.B.; PLEC, D.; ABREU, M.L.; PARIZZI, M.G. Identificação de interpoladores adequados a dados de chuva a partir de parâmetros estatísticos. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 13, p. 7-21, 2014. doi
- LUNDGREN, W.J.C.; SILVA, J.A.A.; FERREIRA, R.L.C. Estimação do volume de eucaliptos por Krigagem e Cokrigagem no Semiárido Pernambucano. **Floresta e Ambiente**, v. 24, p. 1-12, 2017. doi
- MACHADO, N.G.; MEIRELLES, T.; DANELICHEN, V.H.M.; QUERINO, C.A.S.; BIUDES, M.S. Estimation of rainfall by neural network over a Neotropical Region. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 17, p. 44-54, 2015. doi
- MADSEN, H.; LAWRENCE, D.; LANG, M.; MARTINKOVA, M.; KJELDSSEN, T.R. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 3634-3650, 2014. doi
- MAIDMENT, R.I.; GRIMES, D.; BLACK, E.; TARNAVSKY, E.; YOUNG, M. *et al.* A new, long-term daily satellite-based rainfall dataset for operational monitoring in Africa. **Scientific Data**, v. 4, n. 1, p. 1-17, 2017. doi
- MASSARI, C.; CAMICI, S.; CIABATTA, L.; BROCCA, L. Exploiting satellite-based surface soil moisture for flood forecasting in the Mediterranean area: State update versus rainfall correction. **Remote Sensing**, v. 10, n. 292, p. 1-21, 2018. doi
- MELLO, C.R. de; VIOLA, M.R.; CURI, N.; SILVA, A.M. da. Distribuição espacial da precipitação e da erosividade da chuva mensal e anual no Estado do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1878-1891, 2012. doi
- MENDEZ, M.; CALVO-VALVERDE, L.A.; MAATHUIS, B.; ALVARADO-GAMBOA, L.F. Generation of Monthly Precipitation Climatologies for Costa Rica Using Irregular Rain-Gauge Observational Networks. **Water**, v. 11, n. 70, p. 1-22, 2019. doi
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. O que é a Mata Atlântica? In: CAMPANILI, M.; SCHÄFFER, W.B. (orgs.). **Mata Atlântica: Manual de Adequação Ambiental**. Brasília: MMA, p. 3-11, 2010a.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Biodiversidade e Florestas. Biodiversidade única e ameaçada. In: CAMPANILI, M.; SCHÄFFER, W.B. (orgs.). **Mata Atlântica: Patrimônio Nacional dos Brasileiros**. Brasília: MMA, p. 55-68, 2010b.
- NASA. National Aeronautics and Space Administration. **TRMM**. Disponível em https://disc2.gesdisc.eosdis.nasa.gov/data/TRMM_L3/TRMM_3B42_Daily.7/, acesso em 10 jan. 2020.
- NERY, J.T.; CARFAN, A.C.; MARTIN-VIDE, J. Analysis of rain variability using the daily and monthly concentration indexes in Southeastern Brazil. **Atmospheric and Climate Sciences**, v. 7, n. 2, p. 176-190, 2017. doi
- NEW, M.; HULME, M.; JONES, P. Representing Twentieth-Century space-time climate variability. part ii: development of 1901-96 monthly grids of Terrestrial Surface Climate. **Journal of Climate**, v. 13, p. 2217-2238, 2000. doi
- NUNES, A.A.; PINTO, E.J. de A.; BAPTISTA, M.B. Detection of trends for extreme events of precipitation in the Metropolitan Region of Belo Horizonte through statistical methods. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.23, p. 1-13, 2018. doi
- PACA, V.H.M.; ESPINOZA-DÁVALOS, G.; MOREIRA, D.; COMAIR, G. Variability of trends in precipitation across the Amazon River Basin determined from the CHIRPS precipitation product and from station records. **Water**, v. 12, n. 5, p. 1-22, 2020. doi
- PEREIRA, D.R.; YANAGI, S.N.M.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M.; SILVA, L.A. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para a região da Serra da Mantiqueira, MG. **Ciência Rural**, v. 39, n. 9, p. 2488-2493, 2009. doi
- PESSI, D.D.; SANTOS, C.S.A.; NONATO, J.J.; DOURADO, L.G.A.; SILVA, O.P. *et al.* Validação das estimativas de precipitação do satélite TRMM no Estado de Mato Grosso, Brasil. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 42, n. 1, p. 81-90, 2019. doi
- PEZZONI-FILHO, J.C.; BRIDA, A.L. de.; MORAES, D.A. de C.; ZIMBACK, C.R.L.; WILCKEN, S.R.S. *et al.* Meloidogyne exigua (Meloidogynidae) em clones de seringueira em duas épocas do ano. **Ciencia y Tecnología Agropecuaria**, v.19, n.3, p.607-620, 2018. doi
- PORTALÉS, C.; BORONAT, N.; PARDO-PASCUAL, J.E.; BALAGUER-BESER, A. Seasonal precipitation interpolation at the Valencia region with multivariate methods using geographic and topographic information. **International Journal of Climatology**, v. 30, n. 10, p. 1547-1563, 2010. doi
- PRAKASH, S. Performance assessment of CHIRPS, MSWEP, SM2RAIN-CCI, and TMPA precipitation products across India. **Journal of Hydrology**, v. 571, p. 50-59, 2019. doi
- PRASAD, A.M.; IVERSON, L.R.; LIAW, A. Newer classification and regression tree techniques: bagging and random forests for ecological prediction. **Ecosystems**, v. 9, n. 2, p. 181-199, 2006. doi
- REBOITA, M.S.; KRUSCHE, N.; AMBRIZZI, T.; ROCHA, R.P. Entendendo o tempo e o clima na América do Sul. **Terrae Didactica**, v. 8, n. 1, p. 34-50, 2012. doi
- REGOTO, P.; DEREZYSKI, C.; SILVA, W.L.; SANTOS, R.; CONFALONIERI, U. Tendências de extremos de precipitação para o Estado do Espírito Santo. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 41, n. 1, p. 365-381, 2018. doi
- RIVERA, J.A.; HINRICH, S.; MARIANETTI, G. Using CHIRPS Dataset to assess wet and dry conditions along the Semiárido Central-Western Argentina. **Advances in Meteorology**, 8413964, 2019. doi
- ROMERO, H.A.I.; ORTIZ, L.F. Ajuste metodológico al índice de escasez de água propuesto por el ideam en el plan de or-

- denación y manejo de la cuenca del Río Pamplonita, norte de Santander, Colombia. **Colombia Forestal**, v. 11, n. 1, p. 165-173, 2008.
- SANCHES, F. de O.; VERDUM, R.; FISCH, G. Estudo de tendência de chuvas de longo prazo. **Revista Ambiente & Água**, v. 8, n. 3, p. 214-228, 2013. doi
- SALDANHA, C.B.; RADIN, B.; CARDOSO, M.A.G.; RIPPEL, M.L.; FONSECA, L.L. *et al.* Comparação dos dados de precipitação gerados pelo GPCP vs Observados para o estado do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 30, n. 4, p. 415-422, 2015. doi
- SALES, M.A.L.; ROMÁN, R.M.S.; SINOBAS, L.R.; MONTEIRO, R.N.F.; SOUZA, J.V.R.S. Avaliação da disponibilidade hídrica na Sub-Bacia do Boi Branco através do balanço hídrico climatológico e de cultivo. **Irriga**, v. 22, n. 1, p. 1-17, 2017. doi
- SALVIANO, M.F.; GROppo, J.D.; PELLEGRINO, G.Q. Análise de tendências em dados de Precipitação e Temperatura no Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 31, n. 1, p. 64-73, 2016. doi
- SANTOS, L.O.F. dos; QUERINO, C.S.A.; QUERINO, J.K.A. da S.; PEDREIRA, J.A.L.; MOURA, A.R. de M. *et al.* Validation of rainfall data estimated by GPM satellite on Southern Amazon region. **Revista Ambiente & Água**, v. 14, n. 1, p. 1-9, 2019. doi
- SCHUMACHER, R.S. The Studies of Precipitation, Flooding, and Rainfall Extremes across Disciplines (SPREAD) Workshop: An Interdisciplinary Research and Education Initiative. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 97, n. 10, p. 1791-1796, 2016. doi
- SCHUMACHER, V.; JUSTINO, F.; FERNÁNDEZ, A.; MESEGUER RUIZ, O.; SARRICOLEA, P. *et al.* Comparison between observations and gridded datasets over complex terrain in the Chilean Andes: precipitation and temperature. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 12, p. 5266-5288, 2020. doi
- SHEN, S.S.P.; DZIKOWSKI, P.; GUILONG, L.; GRIFFITH, D. Interpolation of 1961-97 Daily Temperature and Precipitation Data onto Alberta Polygons of Ecodistrict and Soil Landscapes of Canada. **Journal of Applied Meteorology**, v. 40, n. 12, p. 2162-2177, 2001. doi
- SHI, P.; QIAO, X.; CHEN, X.; ZHOU, M.; QU, S. *et al.* Spatial distribution and temporal trends in daily and monthly precipitation concentration indices in the upper reaches of the Huai River, China. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 28, n. 2, p. 201-212, 2014. doi
- SILVA, E.C.; CABRAL, J.J.S.P.; FERNANDES, R.C.; GUSMÃO, L.O.; AZEVEDO, J.R.G. Spatial variability of precipitation correlated with relief in Recife metropolitan region and surrounding areas. **Journal of Hyperspectral Remote Sensing**, v. 6, n. 5, p. 225-234, 2016. doi
- SIMPSON, M.J.; HIRSCH, A.; GREMLER, K.; LUPO, A. The importance of choosing precipitation datasets. **Hydrological Processes**, v. 31, n. 25, p. 4600-4612, 2017. doi
- SLOAT, L.L.; GERBER, J.S.; SAMBERG, L.H.; SMITH, W.K.; HERRERO, M. *et al.* Increasing importance of precipitation variability on global livestock grazing lands. **Nature Climate Change**, v. 8, p. 214-218, 2018. doi
- SOUSA, W. dos S.; SOUSA, F. de A.S. Rede neural artificial aplicada à previsão de vazão da Bacia Hidrográfica do Rio Piancó. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 2, p. 173-180, 2010. doi
- SOUZA, W.M. de; AZEVEDO, P.V.; ARAÚJO, L.E. de. Classificação da precipitação diária e impactos decorrentes dos desastres associados às chuvas na cidade do Recife-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 2, p. 250-268, 2012. doi
- SOUZA-CRUZ-BUENAGA, F.V.A.; ESPIG, S.A.; CASTRO, T.L.C.; SANTOS, M.A. Environmental impacts of a reduced flow stretch on hydropower plants. **Brazilian Journal of Biology**, v. 79, n. 3, p. 470-487, 2019. doi
- TOSTES, J.O.; LYRA, G.B.; OLIVEIRA- JÚNIOR, J.F.; FRANCELINO, M.R. Assessment of gridded precipitation and air temperature products for the State of Acre, southwestern Amazonia, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 76, n. 4, p. 153-171, 2017. doi
- TRENBERTH, K.E. Changes in precipitation with climate change. **Climate Research**, v. 47, n. 1, p. 123-138, 2011. doi
- TUNDISI, J.G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 7-16, 2008. doi
- WAGNER, P.D.; FIENER, P.; WILKEN, F.; KUMAR, S.; SCHNEIDER, K. Comparison and evaluation of spatial interpolation schemes for daily rainfall in data scarce regions. **Journal of Hydrology**, v. 465, n. 25, p. 388-400, 2012. doi
- WANG, S.; HUANG, G.H.; LIN, Q.G.; LI, Z.; ZHANG, H. *et al.* Comparison of interpolation methods for estimating spatial distribution of precipitation in Ontario, Canada. **International Journal of Climatology**, v. 34, n. 14, p.3745-3751, 2014. doi
- WANG, S.; LIANG, X.; NAN, Z. How much improvement can precipitation data fusion achieve with a Multiscale Kalman Smoother-based framework? **Water Resources Research**, v. 47, n. 3, p. 1-18, 2011. doi
- WILLMOTT, C.J. On the validation of models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.
- WÜEST, M.; FREI, C.; ALTENHOFF, A.; HAGEN, M.; LITSCHI, M. *et al.* A gridded hourly precipitation dataset for Switzerland using rain-gauge analysis and radar-based disaggregation. **International Journal of Climatology**, v. 30, n. 12, p. 1764-1775, 2010. doi
- XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. An update of Xavier, King and Scanlon (2016) daily precipitation gridded data set for the Brazil. In: **XVIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Campinas, p. 562-569, 2016.
- XAVIER, A.C.; KING, C.W.; SCANLON, B.R. Daily gridded meteorological variables in Brazil (1980-2013). **International Journal of Climatology**, v. 36, n. 6, p. 2644-2659, 2015. doi
- YAMAMOTO, J.K. Correcting the Smoothing Effect of ordinary kriging estimates. **Mathematical Geology**, v. 37, p. 69-94, 2005. doi
- YANG, S.; JONES, P.D.; JIANG, H.; ZHOU, Z. Development of a near-real-time global in situ daily precipitation dataset for 0000-0000 UTC. **International Journal of Climatology**, v. 40, n. 5, p. 2795-2810, 2019.

- YEGGINA, S.; TEEGAVARAPU, R.S.V.; MUDDU, S. A conceptually superior variant of Shepard's method with modified neighbourhood selection for precipitation interpolation. **International Journal of Climatology**, v. 39, n. 12, p. 4627-4647, 2019. [doi](#)
- YIN, L.H.; TING, N.Y.; SHAN, F.P.; SHIMIZU, K.; LATEH, H. Estimation of precipitation data by using deterministic interpolation methods: A case study in Penang Island. **AIP Conference Proceedings**, v. 2184, n. 1, p. 1-11, 2019. [doi](#)
- YOUNG-SIK, M.; WON-HO, N.; MIN-GI, J.; TAEGON, K.; EUN-MI, H. Application of meteorological drought index in the Korean Peninsula using satellite-based Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS). **Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers**, v. 61, n. 2, p. 1-11, 2019.
- YUAN, F.; ZHANG, L.; SOE, K.; REN, L.; ZHAO, C. *et al.* Applications of TRMM- and GPM-Era Multiple-Satellite Precipitation Products for flood simulations at sub-daily scales in a Sparsely Gauged Watershed in Myanmar. **Remote Sensing**, v. 11, n. 140, p. 1-31, 2019. [doi](#)
- ZHANG, X.; JIANG, H.; JIN, J.; XU, X.; ZHANG, Q. Analysis of acid rain patterns in northeastern China using a decision tree method. **Atmospheric Environment**, v. 46, p. 590-596, 2012. [doi](#)
- ZHU, X. Land cover classification using moderate resolution satellite imagery and random forests with post-hoc smoothing. **Journal of Spatial Science**, v. 58, n. 2, p. 323-337, 2013. [doi](#)

Internet Resources

WordClim, <http://worldclim.org/version2>.

Earth Explorer, <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Precipitation - Mendeley Data, <http://dx.doi.org/10.17632/jdbwhxzw5h.2>.

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (type CC-BY), which permits unrestricted use, distribution and reproduction in any medium, provided the original article is properly cited.