

Aplicação e análise de técnicas de interpolação para espacialização de chuvas

Application and analysis of interpolation techniques for spatialization of rainfall

Eléia Righi¹(*)
Luís Alberto Basso²

Resumo

Os métodos de interpolação são ferramentas usualmente utilizadas para gerar superfícies distribuídas de uma determinada variável a partir de dados pontuais. Eles contribuem para a compreensão espacial de atributos, sem a necessidade de levantar dados em toda a área de interesse. Assim, avaliaram-se, comparativamente, diferentes métodos de interpolação de chuvas para a bacia hidrográfica do rio Piratinim – noroeste do Rio Grande do Sul, por meio de análise espacial. Dentre os mais variados existentes, selecionaram-se: Inverso de Distância Ponderada (IDW), Método Kriging (KG), Vizinho Natural (NN) e Função de Base Radial Multiquadrada (RBF). Todos os dados pluviométricos foram obtidos no banco de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), da Agência Nacional das Águas (ANA). Primeiramente, foi analisada a média anual da série histórica (1990-2010), e, posteriormente, conforme informações disponibilizadas no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), foram analisados os anos de 1997 (evento El Niño considerado forte) e 2010 (El Niño considerado fraco). O *software* adotado neste trabalho foi o ArcGIS 10. Realizou-se a validação cruzada dos dados de todos os interpoladores. Os métodos de interpolação empregados para a análise da série histórica e para o ano de 1997 apresentaram valores negativos na correlação. Para o ano de 2010, verificou-se que o NN foi o melhor interpolador, com correlação positiva de 0.7. Assim, conclui-se que a estimativa da precipitação com modelos estatísticos também representa uma alternativa potencial, dada à sua facilidade operacional e capacidade de estimar a precipitação para um local específico, reduzindo o tempo de trabalho e de recursos investidos.

Palavras chaves: algoritmos matemáticos; chuvas; distribuição espacial.

1 MSc.; Geógrafa; Doutoranda no Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Endereço: Avenida Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43113 – Sala 203, *Campus* do Vale, CEP: 91501-900, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil; E-mail: leiarighi@yahoo.com.br

2 Dr.; Geógrafo; Professor Associado do Departamento de Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul; Endereço: Avenida Bento Gonçalves, 9500, Prédio 43136 – Sala 215, Agronomia, CEP: 91501-970, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, Brasil. E-mail: lbasso@terra.com.br

Abstract

The interpolation methods are tools commonly used to generate surfaces distributed in a given variable based on accurate data. They contribute to aid understanding of the spatial attributes without the need to collect data in the entire area of interest. In view of this, this study evaluated comparatively different rainfall interpolation methods for the river basin *Piratinim*, in the northwest of *Rio Grande do Sul*, through spatial analysis. Among the variety of existing methods it was selected the following: Inverse Distance Weighted (IDW), Kriging method (KG), Natural Neighbor (NN) and Multi-quadrada Radial Basis Function (RBF). All the rainfall data were obtained from the National Information System on Water Resources (SNIRH) of the National Water Agency (ANA). First, it was analyzed the annual average of the historical series (1990-2010), and later, according to information available in the website of National Institute for Space Research (INPE), it was analyzed the years of 1997 (El Niño event - considered strong) and 2010 (El Niño - considered weak). The software used was the ArcGIS 10 and it was developed the cross-validation of data of all interpolators. The interpolation methods employed for the analysis of the historical series and for the year of 1997 showed negative correlation values. For the year 2010, it was found that the NN was the best interpolator, with positive correlation of 0.7. Thus, it was concluded that the estimated precipitation with statistical models also represents a potential alternative given its operational easiness and capacity to estimate the precipitation for a specific location, reducing labor time and invested resources.

Key words: mathematical algorithms; rainfall; spatial distribution.

Introdução

Os métodos de interpolação são ferramentas usualmente utilizadas para gerar superfícies distribuídas de uma determinada variável a partir de dados pontuais. Eles contribuem para a compreensão espacial de atributos, sem a necessidade de levantar dados em toda a área de interesse.

Nesse contexto, o estudo da distribuição espacial das chuvas é fundamental na gestão dos recursos hídricos. Considerando-se o ciclo hidrológico, a precipitação é a entrada efetiva de água na bacia hidrográfica. Sua distribuição espaço-temporal, conjuntamente com outros fatores, como a litologia, o tipo e o uso do solo e as formações vegetais, condicionam a resposta hidrológica da bacia.

A acurácia na estimativa da distribuição espacial da chuva requer uma densa rede pluviométrica e um alto custo operacional. Aliadas a isso, as falhas do operador nas anotações da medição de chuva podem acarretar uma baixa densidade de amostras. Sendo assim, é necessário estimar o “ponto” de chuva não registrado ou de localizações de valores circunvizinhos (GOOVAERTS, 2000, p.116).

Stark³ (1979 apud MAZZINI; SCHETTINI, 2009, p. 54), esclarecem que a interpolação é o processo matemático de achar valores intermediários entre os valores discretos de uma função. Especialmente,

3 STARK, P. Introdução aos métodos numéricos. Tradução de João Bosco Pitombeira de Carvalho. Rio de Janeiro: Interciência, 1979. 426p.

é o procedimento para estimar valores de propriedades de locais não amostrados, baseando-se em valores de dados observados em locais conhecidos (BURROUGH, 1986).

Childs (2004, p. 33) afirma que cada método de interpolação pode ser útil para uma aplicação específica, que depende principalmente do fenômeno estudado e da distribuição espacial dos pontos amostrais.

Assim, o objetivo deste estudo é avaliar comparativamente diferentes métodos de interpolação de precipitação para a bacia hidrográfica do rio Piratinim, por meio de análise espacial. Dentre os mais variados existentes, selecionaram-se: Função de Base Radial Multiquadrada (RBF), Método Kriging (KG), Inverso de Distância Ponderada (IDW) e Vizinho Natural (NN).

A escolha apenas desses métodos para a análise comparativa ocorreu em função de eles fornecerem estimadores otimizados com propriedades de não tendenciosidade.

Essas técnicas de interpolação, por apresentarem precisão e agilidade, permitem desenvolver práticas apropriadas e, até mesmo, medidas mitigadoras quanto ao uso do solo em uma região.

Área de estudo

O rio Piratinim é um afluente da margem esquerda do rio Uruguai na sua transição entre alto e médio curso. A bacia hidrográfica do rio Piratinim está inserida dentro da Unidade U040 da bacia Piratinim (FEPAM, 2006), localizada no noroeste do estado do Rio Grande do Sul (Figura 1) e possui uma área de aproximadamente 5.598 km².

Os principais cursos fluviais da bacia são os arroios Inhacapetum, Itu, Tungue, Piraju, Ximbocú, além do rio Piratinim. Os principais usos da água são para irrigação,

dessedentação animal e abastecimento humano, principalmente nas áreas urbanas dos municípios de São Miguel das Missões, Santo Antônio das Missões, São Nicolau, Bossoroca e São Luís Gonzaga.

Nessa região, existem sérios problemas ambientais, como a descarga de esgotos sem tratamento nos corpos hídricos; atividade agrícola sem utilização de práticas de conservação dos solos; significativa retirada de água para irrigação (conflito com outros usos da água); uso indiscriminado de agrotóxicos; graves processos erosivos, assoreamento dos mananciais hídricos e contaminação por agrotóxicos; desmatamento intenso, principalmente ao longo dos cursos d'água (matas ciliares); e desequilíbrio natural pela drenagem das zonas úmidas.

Tendo em vista o importante papel que desempenham as atividades agrícolas na economia dos municípios, é fundamental a caracterização adequada das condições pluviométricas da bacia do rio Piratinim.

Métodos de interpolação espacial

O presente estudo não visa discutir os algoritmos matemáticos, mas apenas demonstrar a sua aplicação prática. Assim, foram aplicados os métodos que serão descritos a seguir.

Função de Base Radial Multiquadrada (RBF): conjunto de métodos de interpolação exato de uma função por meio de uma série de polinômios. A maioria dos métodos são derivações de *spline* ou método de mínimo de curvatura, com características similares um dos outros (GOLDEN SOFTWARE, 1996, p. 18). É aconselhável usá-lo na situação de dados muito dispersos e baseia-se na formação de combinações lineares de funções radiais podendo ser representado pela seguinte fórmula:

$$s(x) = p(x) + \sum_{i=1}^N \lambda_i \phi(|x - x_i|), \quad x \in \mathbb{R}^d \quad (1)$$

Onde: “p” é um polinômio de grau máximo k; λ_i é o peso real $\{\lambda_i: i = 1, 2, \dots, n\}$ estimado dos valores de dados; $\phi(x)$ é a função base e $(|x - x_i|)$ é a distância euclidiana da localização estimada “ x_i ” de cada dado localizado “x” (LUO *et al*, 2008, p. 949). A escolha da função base $\phi(x)$ dá origem a diferentes métodos como o método *Radial Basin Multiquadric* (RDB). Nesse contexto, é uma função real positivo “r”, onde este é a distância (raio) de origem, conforme as funções a seguir:

$$\begin{aligned} \phi(r) &= r^2 \log(r) \\ \phi(r) &= \sqrt{r^2 + c^2} \end{aligned} \quad (2)$$

Método Kriging (KG): é baseado em uma função contínua que explica o comportamento de uma variável nas distintas direções de um espaço geográfico, e permite associar a variabilidade da estimação com base na distância que existe entre um par de pontos, pelo uso de um semivariograma (GALLARDO, 2006, p. 4). A determinação experimental do semivariograma para cada valor de h considera todos os pares de amostras $z(x)$ e $z(x+h)$, separadas pelo vetor distância h, a partir da equação:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \quad (3)$$

Onde $\gamma(h)$ é o semivariograma estimado, $N(h)$ é o número de pares de valores medidos, $z(x)$ e $z(x+h)$, separados pelo vetor h.

Inverso da Distância Ponderada (IDW): é considerado o método mais simples de interpolação, que atribui peso maior ao ponto mais próximo, diminuindo esse peso com o aumento da distância e em função do coeficiente potência α .

$$\hat{Z}(x) = \frac{\sum_{i=1}^n Z(x_i) \frac{1}{d_{ij}^\alpha}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_{ij}^\alpha}} \quad (4)$$

Onde: z = valores estimados; x = número de amostras; x_i = valores conhecidos; d_i = distâncias entre os valores conhecidos e estimados.

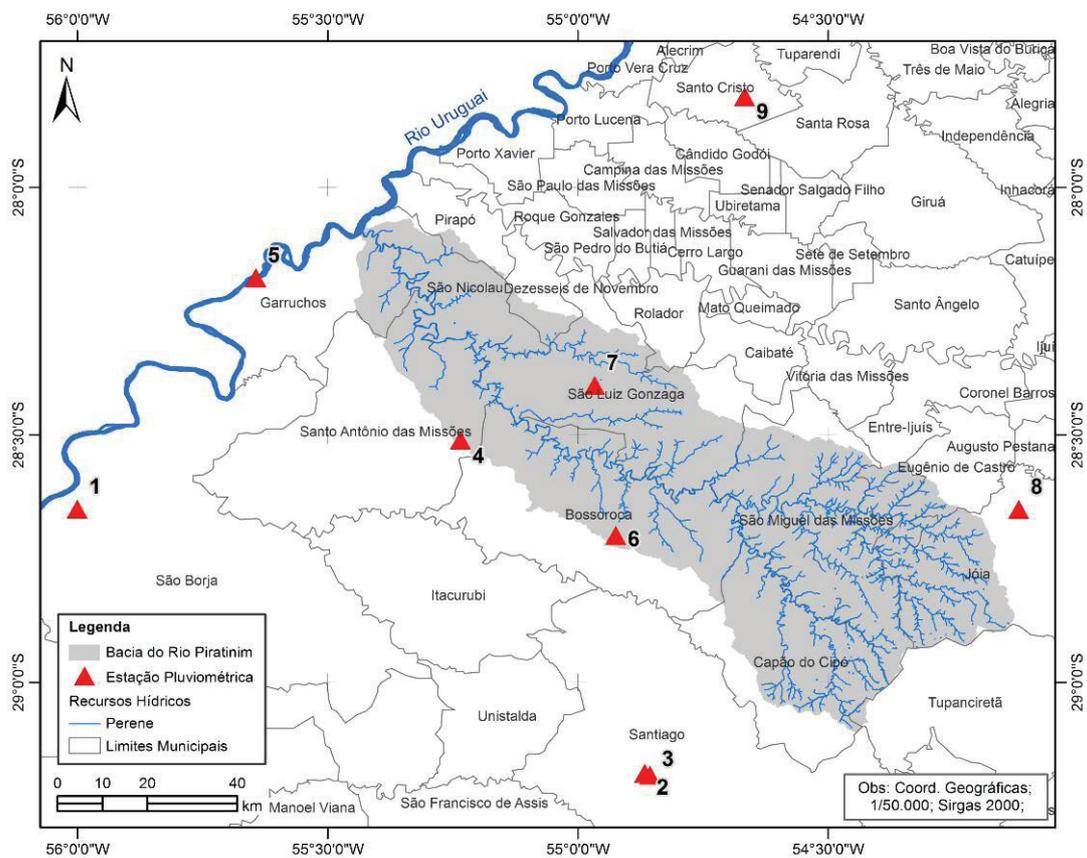
Vizinho Natural (NN): usa equação idêntica à do IDW. A diferença entre ambos é o cálculo dos pesos e o método usado para selecionar o subconjunto de pontos de dispersão utilizados para a interpolação. O método *Vizinhança Natural* está baseado na rede polígono de Thiessen do conjunto de pontos de dispersão. Essa rede pode ser construída a partir da triangulação *Delauney* de um conjunto de pontos de dispersão. A triangulação *Delauney* é uma TIN (rede triangular irregular) que foi construída de modo que o critério *Delauney* fosse satisfeito (ESRI®, 2010).

Metodologia

Todos os dados pluviométricos foram obtidos no banco de dados do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos - SNIRH da Agência Nacional das Águas – ANA (Figura 2). A numeração dos postos pluviométricos adotada neste estudo não é a oficial (Tabela 1).

Primeiramente, foi analisada a média anual da série histórica (1990-2010) e, posteriormente, foram investigados os anos de 1997 e 2010 segundo a ocorrência do fenômeno El Niño. Conforme informações disponibilizadas no site do INPE (Tabela 2), o ano de 1997 foi reconhecido com um

Figura 2 - Mapa de localização das estações pluviométricas



Fonte: Righi, E.; Basso, L.A. (2015).

Tabela 1 - Código das Estações

Código Estação	Número Adotado	Coord. x	Coord. y
2856003	1	-56.000000	-28.650000
2954011	2	-54.866667	-29.183333
2954020	3	-54.855833	-29.186667
2855007	4	-55.234722	-28.510556
2855001	5	-55.643333	-28.182500
2850019	6	-54.924444	-28.702778
2854011	7	-54.966667	-28.400000
2854018	8	-54.119444	-28.650278
2754006	9	-54.666667	-27.816667

Fonte: Righi, E.; Basso, L.A. (2015).

evento considerado forte (chuvoso), e 2010 apresentou um episódio julgado fraco (seco).

O *software* utilizado neste trabalho foi o ArcGIS 10, o qual executa os métodos de interpolação referidos através da extensão 3D Analyst, que gera campos numéricos a partir de dados pontuais (Interpolação a Raster). Os dados de entrada para o processamento foram constituídos por arquivos em formato vetor (pontos) contendo a posição dos postos pluviométricos (latitude e longitude), com o valor de precipitação média anual dos mesmos como dado associado (valor z). A resolução dos campos de precipitação gerada pelas análises realizadas foi ajustada a 0.001° (aproximadamente 1000 m²). O raio de busca de valores próximos foi programado para ser variável, com limite máximo de 5 postos.

Tabela 2 - Eventos El niño

Anos	Intensidade do evento
1972 – 1973	Forte
1976 – 1977	Fraco
1977 – 1978	Fraco
1979 – 1980	Fraco
1982 – 1983	Forte
1986 – 1988	Moderado
1990 – 1993	Forte
1994 – 1995	Moderado
1997 – 1998	Forte
2002 – 2003	Moderado
2004 – 2005	Fraco
2006 – 2007	Fraco
2009 – 2010	Fraco

Fonte: INPE, 2014.

Realizou-se a validação cruzada dos dados de todos os interpoladores, pela metodologia apresentada em Robinson e Metternicht (2006) e Amorim *et al.* (2008),

na qual um posto específico é descartado sucessivamente na realização da interpolação. Assim, é possível obter o valor estimado relativo ao posto retirado e, posteriormente, compará-lo com o valor real da variável.

Resultados e Discussões

A análise iniciou com a interpolação da média anual da série histórica (1990-2010). Verificou-se que as superfícies interpoladas geradas pelos quatro interpoladores não demonstraram diferenças significativas, exceto a gerada pelo método da krigagem, que apresentou uma superfície mais suavizada (Figura 3).

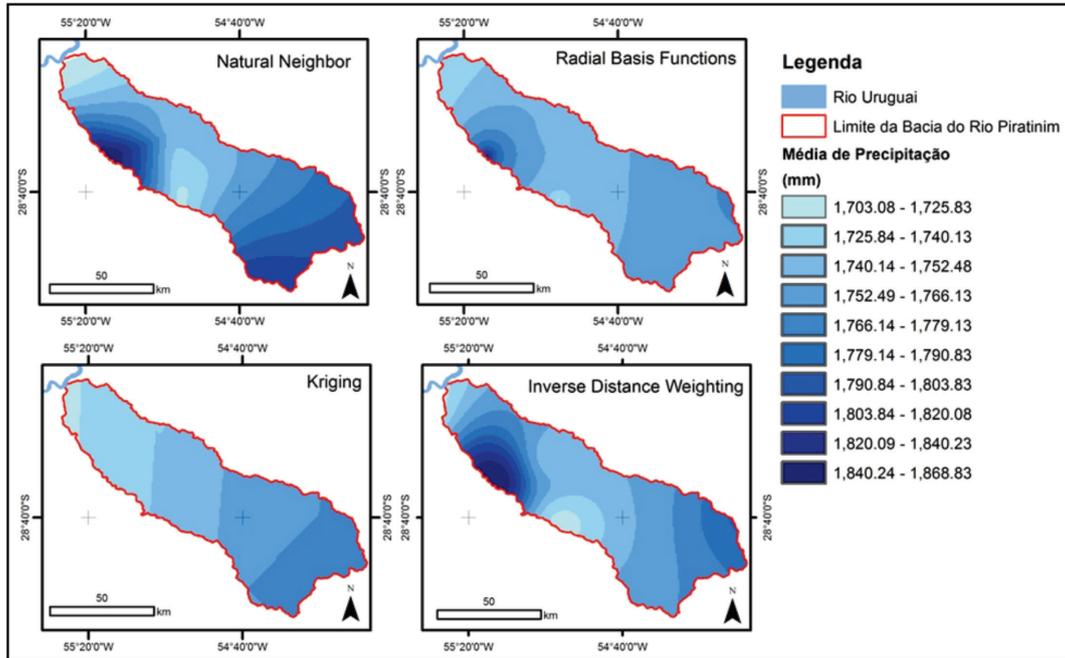
A krigagem é um método geoestatístico (não exato) que se baseia na Teoria das Variáveis Regionalizadas, que supõe que a variação espacial de um fenômeno é estatisticamente homogênea em uma área.

O método Inverso de Distância Ponderada (IDW) e Vizinho Natural (NN) formaram contornos significativos ao redor dos pontos de amostragem. Essa tendência é explicada, também, pelo caráter estatístico dos métodos, de forma que a influência de cada ponto tende a ter um raio de ação definido de forma igual em todas as direções, o que possibilita a formação de círculos.

A partir dos mapas temáticos da distribuição da precipitação constatou-se que os maiores índices de precipitação com os métodos NN, IDW e RBF ocorrem mais a jusante da bacia, nos municípios de Santo Antônio das Missões e Bossoroca, e com o método da KG mais a montante, nos municípios de Joia e Capão do Cipó.

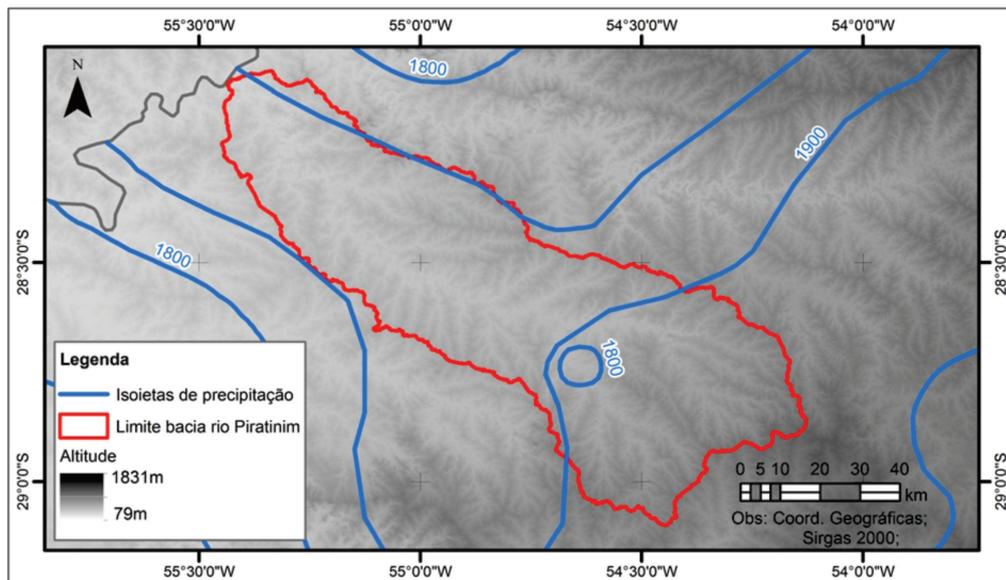
Ao se compararem os dados elaborados com os dados do Atlas Pluviométrico do Brasil (Figura 4), verifica-se que os resultados foram semelhantes, com a

Figura 3 - Métodos de interpolação da média da série histórica



Fonte: Righi, E.; Basso, L.A. (2015).

Figura 4 - Isoietas Médias Anuais de 1977 a 2006



Fonte: Righi, E.; Basso, L.A. (2015).

Nota: escala 1:5.000.000 (adaptado do Atlas Pluviométrico do Brasil, 2012 - CPRM).

concentração das chuvas mais intensas, localizadas a jusante da bacia.

Ao analisar a correlação dos dados obtidos entre os interpoladores, constatam-se valores negativos (Figura 5). Duas variáveis que estão perfeitamente correlacionadas positivamente ($r=1$) movem-se essencialmente na mesma direção, enquanto dois conjuntos que estão perfeitamente correlacionados negativamente movem-se em direções opostas.

Nesse sentido, a figura 5 evidencia que todos os interpoladores não foram satisfatórios, pois apresentaram valores negativos. Porém, do conjunto de interpoladores pesquisados, aquele que teve o melhor resultado foi o NN.

Alves (2012) avaliou o desempenho de diferentes métodos de interpolação para a temperatura do ar no campus de Cuiabá da Universidade Federal de Mato Grosso. Entretanto, o método vizinho natural demonstrou-se ligeiramente mais eficiente, pois apresentou uma correlação elevada entre os valores reais e os valores estimados.

Botelho et al. (2005) compararam os interpoladores Inverso Ponderado da Distância (IDW) e Vizinho Natural, no

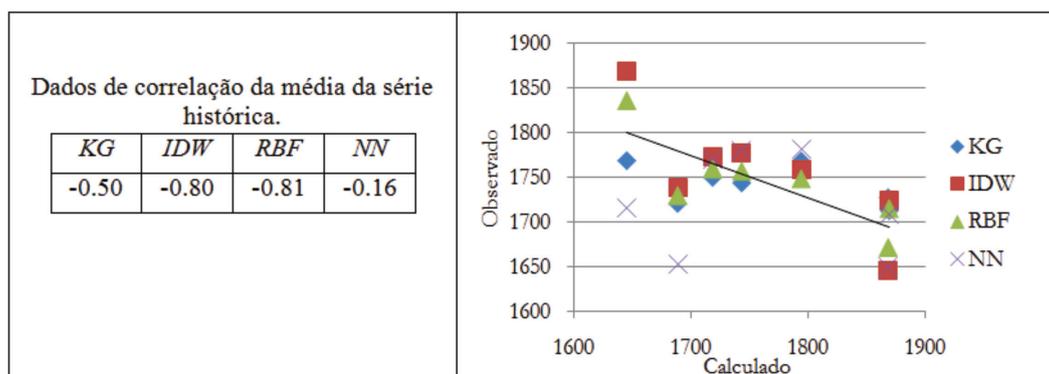
cálculo do volume de uma edificação, a partir de dados LiDAR, apresentando que o interpolador Vizinho Natural se mostrou eficiente e produziu um produto mais acurado que o outro interpolador testado.

Na figura 6, observa-se o semivariograma da krigagem estável, que foi aplicado na geração da interpolação. Isaaks e Srivastava (1989) salientam que o semivariograma mede o grau de dependência espacial entre os elementos amostrais e define parâmetros para a estimativa de valores em locais não amostrados.

O conhecimento do alcance do semivariograma é fundamental para a interpretação dos resultados obtidos pelas técnicas geoestatísticas e, em termos práticos, representa a distância limite da dependência espacial. Estes variaram em aproximadamente 245 km, permitindo constatar uma abrangente dependência espacial da precipitação da série histórica na bacia hidrográfica.

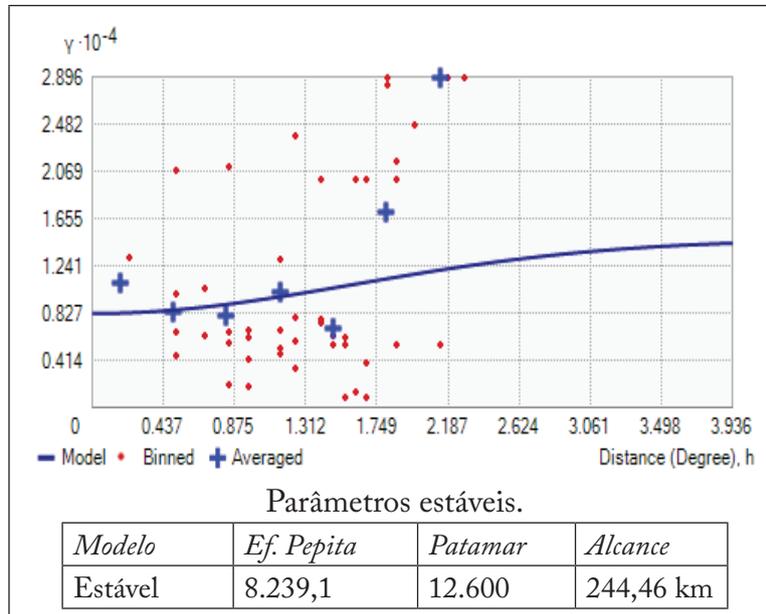
A figura 7 apresenta o gráfico que mostra a Validação Cruzada dos dados interpolados. A ilustração demonstra que, nos postos com precipitação observada baixa ou muito alta, todos os métodos de

Figura 5 - Validação da média anual dos dados de chuva interpolados versus os dados observados para a média anual da série histórica



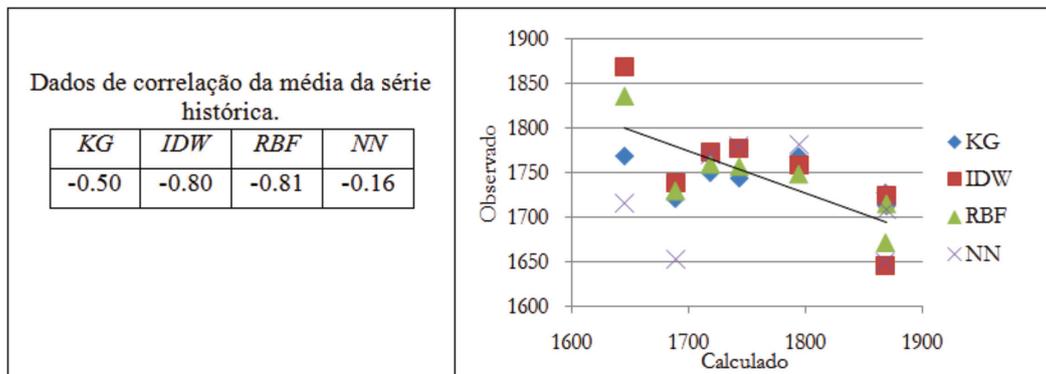
Fonte: Righi, E.; Basso, L.A. (2015).

Figura 6 - Semivariograma Estável



Fonte: Righi, E.; Basso, L.A. (2015).

Figura 7 - Validação cruzada dos postos pluviométricos para os métodos utilizados (série histórica)



Fonte: Righi, E.; Basso, L.A. (2015).

interpolação superestimam ou subestimam esse valor. Isto pode ser devido aos postos estarem situados isolados dos demais, ou seja, fora do limite físico da bacia.

A Validação Cruzada é um procedimento do qual cada ponto amostral “estação pluviométrica” é retirado, e seu

valor é predito através de um interpolador em função do restante da amostra. Essa operação é repetida para os “n” pontos amostrais, possibilitando identificar a diferença (erro) entre os valores medidos (observados) e os preditos (estimados) (BAILEY; GATRELL, 1995).

Nas interpolações do ano chuvoso de 1997, pode-se observar um comportamento predominantemente de superestimativa constante para o mapa da Krigagem (Figura 8), o que não acontece na realidade.

Esse fato ocorre quando as amostras entram em um estado de efeito aleatório ou em estacionariedade após determinada distância entre os pares de pontos, o que caracteriza um comportamento tendencioso do conjunto. Landim, Sturaro e Monteiro (2002) ressaltam que um fenômeno é estacionário quando, na região na qual se pretende fazer as estimativas, este é descrito como homogêneo dentro desse espaço.

Pode-se averiguar, também, que a amplitude de variação da precipitação média do ano chuvoso ao longo da bacia foi grande, sendo de aproximadamente 470 mm, apresentando, como na média histórica, os maiores índices no setor a jusante da bacia. Tal comportamento está certamente relacionado à extensão da bacia e à aproximação do rio Uruguai, onde o rio Piratinim desemboca.

Em relação à validação dos dados interpolados, comprovou-se que a correlação dos interpoladores foi negativa. Isso denota que as duas variáveis movem-se em direções opostas (Figura 9) e entre os quatro interpoladores investigados, o NN foi novamente aquele que apresentou o melhor resultado.

Apesar de o método da krigagem ser muito usado para interpolação de precipitação pluvial, no presente estudo, ele apresentou um comportamento insatisfatório em relação à correlação.

Silva et al. (2007) concluíram, em um trabalho realizado para a avaliação de interpoladores para a espacialização de variáveis climáticas, que o método de Krigagem apresentou melhores resultados na interpolação.

Reis et al. (2005), em seu trabalho de espacialização dos dados de precipitação para o estado de Goiás e para o Distrito Federal, utilizando os métodos de interpolação IDW e Krigagem, verificaram que ambos os métodos e suas variantes utilizadas mostraram-se adequados à realização da interpolação

É importante ressaltar que a diminuição significativa na correlação da precipitação interpolada e observada, deve-se, provavelmente à distribuição dos postos pluviométricos, os quais resultam em poucos pontos no semivariograma amostral, dificultando o seu ajuste a um modelo teórico.

Na figura 10, observa-se o semivariograma da krigagem ajustado para os dados observados nos postos pluviométricos, para o modelo estável.

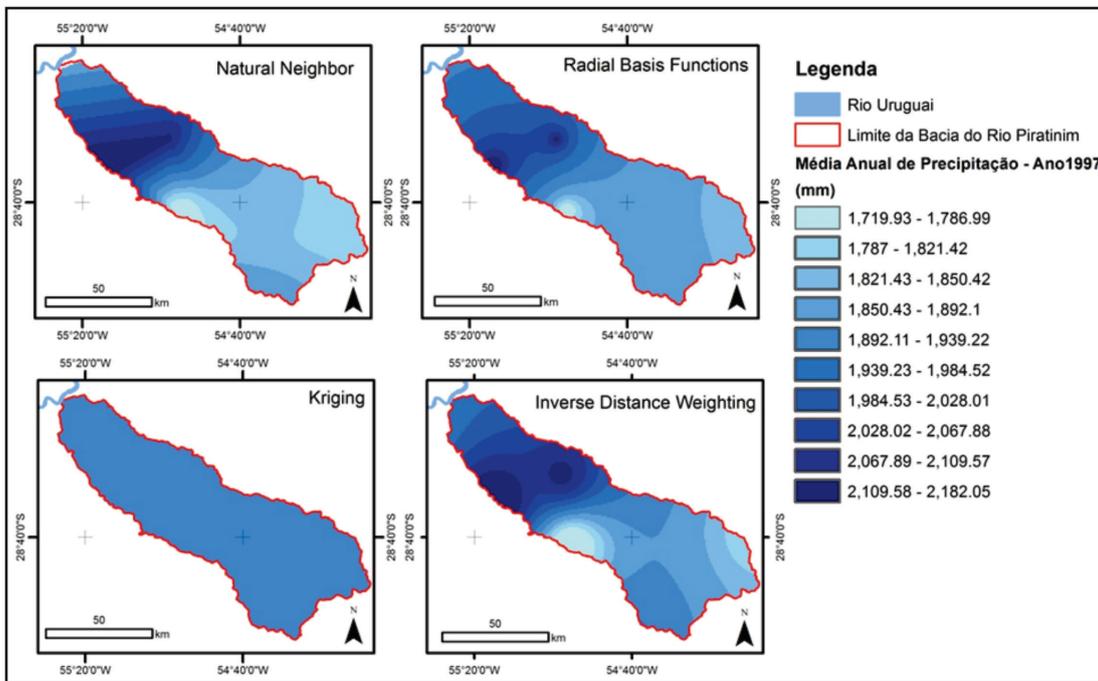
A figura 11 apresenta a validação cruzada, verificando que, nesse caso, os valores também foram superestimados e subestimados.

De acordo com Vieira (2000, p. 22), quando se realiza a estimativa de valores em locais não medidos, ocorre certo grau de incerteza sobre as hipóteses assumidas ou, mesmo, sobre os parâmetros ajustados. Essa incerteza é devida ao erro de estimativa. Assim, insere-se a validação cruzada, como uma avaliação do erro de interpolação produzido.

Berlato e Fontana (2003) analisaram as anomalias (desvio da normal) da precipitação pluvial ocorrida no período de julho de 1997 a junho de 1998 e constataram que houve grandes excessos de precipitação pluvial em todo o Estado, sendo a região noroeste a mais atingida, com excedentes pluviométricos iguais ou maiores do que 1000 mm, em algumas áreas, nesse período de 12 meses, sendo proporcional aos valores encontrados neste estudo.

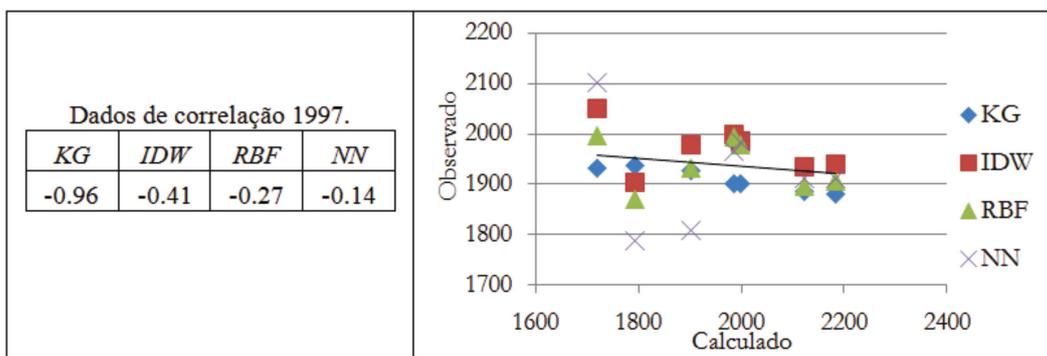
Na interpolação do ano considerado seco, ano de 2010 (Figura 12), verifica-se que os resultados obtidos evidenciaram uma

Figura 8 - Métodos de interpolação do ano de 1997 (media anual)



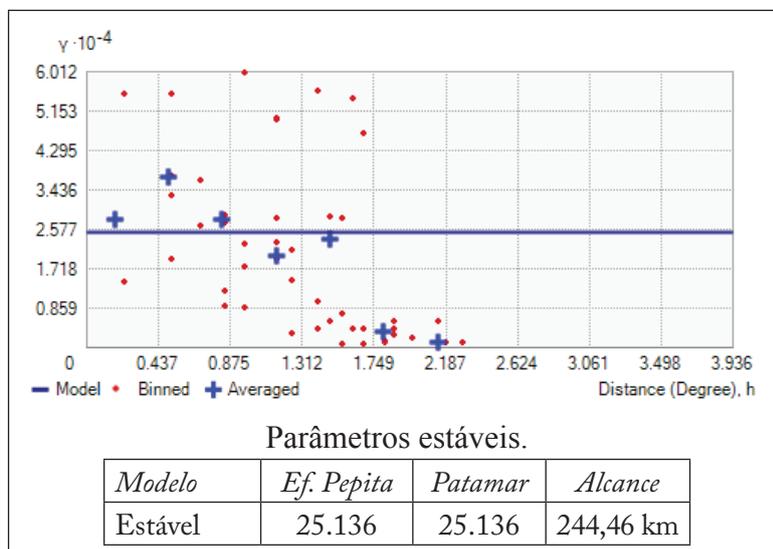
Fonte: Righi, E.; Basso, L.A. (2015).

Figura 9 - Validação da média anual dos dados de chuva interpolados versus os dados observados para o ano de 1997



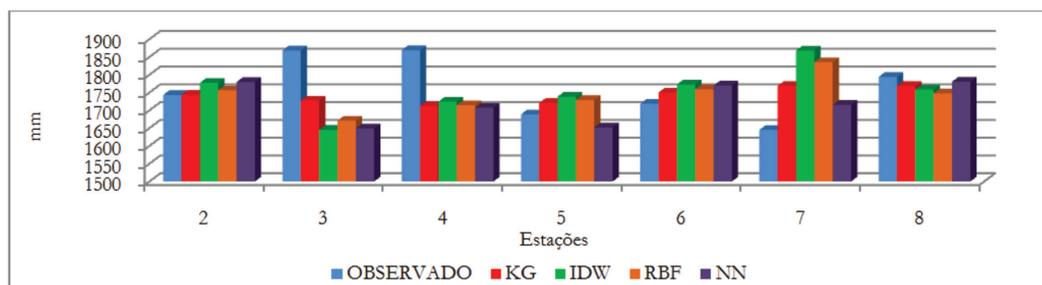
Fonte: Righi, E.; Basso, L.A. (2015).

Figura 10 - Semivariograma estável



Fonte: Righi, E.; Basso, L.A. (2015).

Figura 11 - Validação cruzada dos postos pluviométricos para os métodos utilizados (ano 1997)



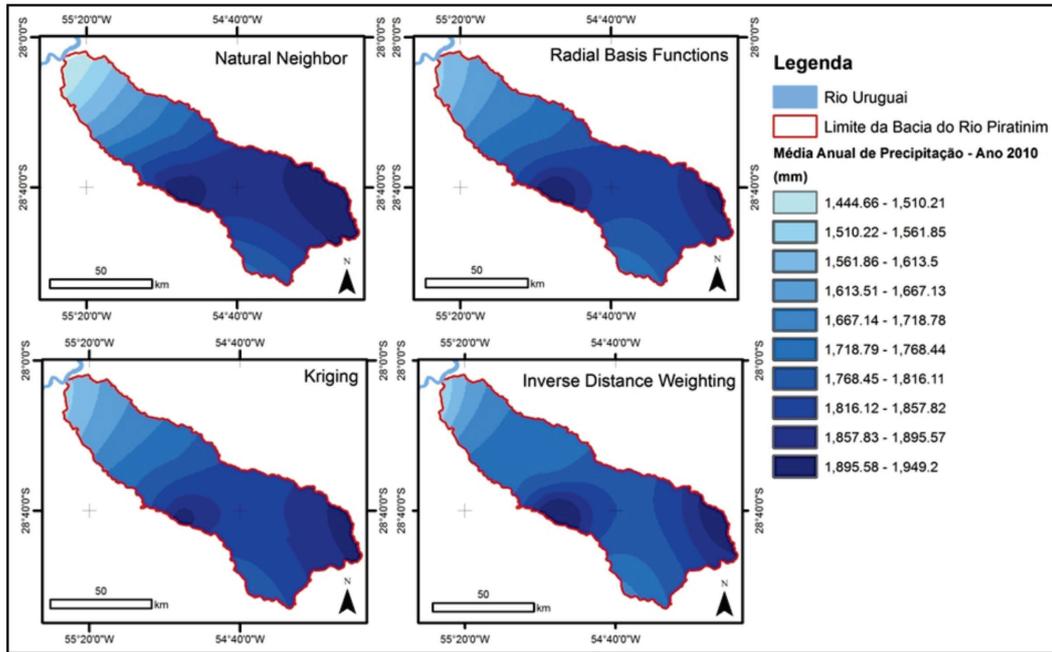
Fonte: Righi, E.; Basso, L.A. (2015).

concentração de chuva nas áreas localizadas mais a montante da bacia.

Observou-se que a amplitude de variação da precipitação média do ano seco, ao longo da bacia, foi maior que a do ano chuvoso, sendo de aproximadamente 500 mm. Mas a média da precipitação do ano seco foi inferior a do ano chuvoso, em aproximadamente 1950 mm no ano seco e 2200 mm no chuvoso.

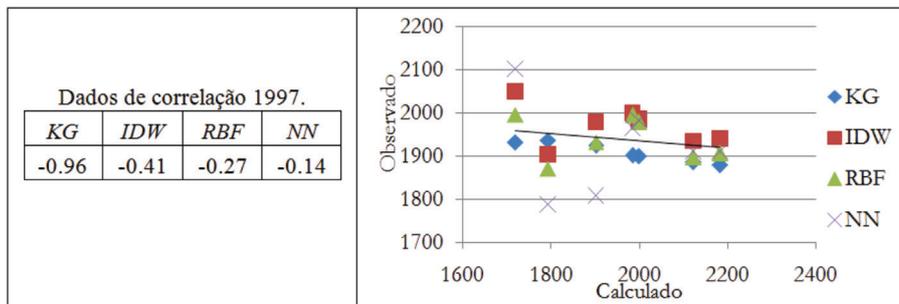
Como a correlação é uma importante ferramenta para verificar qual é o melhor método para interpolação, ela foi realizada entre as médias anuais validadas de precipitação para os diferentes métodos utilizados (Figura 13). Percebe-se que ocorreu uma correlação significativa para o método NN, pois duas variáveis que estão correlacionadas otimamente devem possuir um valor maior ou igual a 0.7.

Figura 12 - Métodos de interpolação do ano de 2010 (média anual)



Fonte: Righi, E.; Basso, L.A. (2015).

Figura 13 - Validação da média anual dos dados de chuva interpolados versus os dados observados para o ano de 2010



Fonte: Righi, E.; Basso, L.A. (2015).

Foi possível constatar que a interpolação com o método NN obteve um bom desempenho na espacialização da precipitação, não apenas para o ano considerado seco, mas também em relação ao ano chuvoso e na média da série histórica.

Jimenez e Domecq (2008), em um estudo para a validação de dados pluviométricos para três períodos diários de precipitação (20/05/1983, 30/05/1983 e 06/10/2005), também concluíram que a vizinhança natural apresentava a melhor

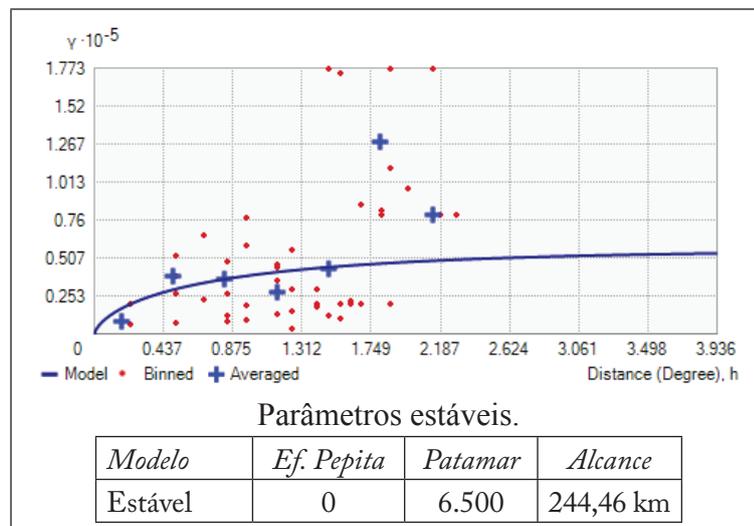
correlação quando comparada ao método de IDW e ao método de Krigagem.

Na figura 14, observa-se o semivariograma da krigagem estável. Comprova-se que o Efeito Pepita foi $\gamma(0)=0$ (zero), o que é considerado ideal. O efeito pepita é o valor da semivariância para a distância zero e representa a componente

da variabilidade espacial que não pode ser relacionada com uma causa específica (variabilidade ao acaso).

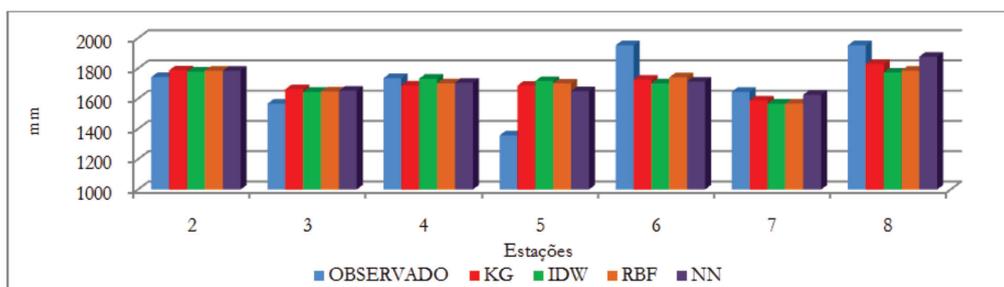
Assim como ocorreu nas outras análises, para o ano de 2010, considerado um ano com precipitação abaixo da média, a validação cruzada manteve um comportamento de superestimava e subestimativa (Figura 15).

Figura 14 - Semivariograma estável



Fonte: Righi, E.; Basso, L.A. (2015).

Figura 15 - Validação cruzada dos postos pluviométricos para os métodos utilizados (ano 2010)



Fonte: Righi, E.; Basso, L.A. (2015).

Considerações Finais

Os métodos de interpolação empregados para a representação espacial da

precipitação, a partir dos postos pluviométricos para a análise da série histórica e para o ano de 1997, apresentaram valores negativos na correlação. Entre os métodos aplicados, o

que melhor correlacionou (mesmo sendo negativo) foi o Vizinho Natural (NN).

O método da krigagem teve o pior resultado quando comparado com os demais métodos aplicados no ano de 1997. Isso se deve ao fato de as médias serem relativamente constantes e de valor muito semelhante à média que é conhecida dos pontos vizinhos, ficando a superfície totalmente homogênea dentro da bacia, o que não ocorre na realidade.

No ano de 2010, verificou-se que o NN foi o melhor interpolador. Essa conclusão, ainda que baseada em um único evento, é corroborada tanto pela representação espacial da chuva interpolada pelo método, o qual gerou uma superfície com gradientes suavizados, mais condizente com a realidade,

quanto pelo aumento da correlação na validação cruzada (0.7).

A estimativa da precipitação com modelos estatísticos também representa uma alternativa potencial, dada à sua facilidade operacional e capacidade de estimar a precipitação para um local específico, reduzindo equívocos na interpretação e análise de mapas, os quais fornecem faixas de valores.

Conclui-se, também, que o uso de interpoladores pode ser aplicado com economia de tempo e de recursos investidos. Essa sequência de procedimentos apresentada pode ser repetida para outras áreas, de forma que, primeiramente, seja testado o interpolador Vizinho Natural.

Referências

ALVES, E. D. et al. Interpolação espacial na climatologia: análise dos critérios que precedem sua aplicação. **Revista GEONORTE**, Edição Especial 2, v.1, n.5, p.606 – 618, 2012.

AMORIM, R. C. F.; RIBEIRO, A.; LEITE, C. C.; LEAL, B. G.; SILVA, J. B. G. Avaliação do desempenho de dos métodos de espacialização da precipitação pluvial para o estado de Alagoas. **Acta Scientiarum Technology**, v.30, n.1, p.87-91, 2008.

BAILEY, Trevor C.; GATRELL, Anthony C. **Interactive Spatial Data Analysis**. Prentice Hall; Pap/Dsk edition. 1995. 432p.

BERLATO, Moacir Antônio; FONTANA, Denise Cybis. **El Niño e La Niña: Impactos no clima, na vegetação e na agricultura do Rio Grande do Sul – Aplicações de previsões climáticas na agricultura**. Porto Alegre: UFRGS, 2003.

BOTELHO, M. F.; SILVA, C. R.; SCHOENINGER, E. R.; CENTENO, J. A. S. Comparação dos resultados de interpoladores “Vizinho mais próximo” e “Inverso de uma distância” no cálculo de volume a partir de dados do laser scanner. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...**, Goiânia: INPE, 2005. p. 731-736.

BURROUGH, P. A. **Principles of geographical information systems for land resources assessment**. Oxford: Clarendon Press, 1986. 193 p. (N.12).

- CHILDS, C. **Interpolating surfaces in ArcGIS Spatial Analyst**. ArcUser, July-September. p. 32-35, 2004.
- CPRM. Serviço Geológico do Brasil. **Atlas Pluviométrico do Brasil**. 2014. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 12 nov. 2014.
- ESRI®. Environmental Systems Research Institute. **Tutoriais ArcGis**. Redlands: Esri, 2010.
- FEPAM. **Regionalização do Estado do RS em Regiões Hidrográficas**. Estabelecida pela Lei Estadual 10.350/1994, em seu artigo 38, atualizado em 2006.
- GALLARDO, A. Geostatística. **Ecosistemas**, Mósteles, v. 15, n. 3, p. 1-11, 2006.
- GOLDEN SOFTWARE INC. **User's Guide**. Colorado USA, 1996. 56 p.
- GOOVAERTS, P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. **Journal of Hydrology**, Michigan, v.228, n.2, p. 113-129, 2000.
- HARTKAMP, A. D.; DE BEURS, K.; STEIN, A.; WHITE, J. W. **Interpolation techniques for climate variables**. México: CIMMYT, 1999. 34 p. (NRG-GIS Series 99-01. México, D.F.).
- INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Eventos El niño e La niña**. Disponível em: <<http://www.inpe.br/>>. Acesso em: 10 nov. 2014.
- ISAACS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989.
- JIMENEZ, K. Q.; DOMECCQ, F. M. **Estimação de chuva usando métodos de interpolação**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas/Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2008. 16 p.
- LANDIM, P. M. B.; STURARO, J. R.; MONTEIRO, R. C. **Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada**. Rio Claro: DGA, IGCE, UNESP, 2002.
- LUO, W.; TAYLOR, M. C.; PARKER, S. R. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales. **International Journal of Climatology**, Sand Hutton, v.28, n.7, p. 947-959, 2008.
- MARTINEZ-COB, A. Multivariate geostatistical analysis of evapotranspiration and precipitation in mountainous terrain. **Journal of Hydrology**, v.174, p.19-35, 1996.
- MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase sinóticos. **Brazilian Journal of Aquatic Sciences and Technology**, v.13, n.1, p. 53-64, 2009.
- MELLO, C. R. DE.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J. M.; SILVA, M. S. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.5, p.925-933, 2003.

REIS, M. H.; GRIEBELER, N. P.; SARMENTO, P. H. L.; OLIVEIRA, L. F. C. de.; OLIVEIRA, J. M. de. Espacialização de dados de precipitação e avaliação de interpoladores para projetos de drenagem agrícola no estado de Goiás e Distrito Federal. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12., 2005, Goiânia. **Anais...**, Goiânia: INPE, 2005. p. 229-236.

ROBINSON, T. P.; METTERNICHT, G. Testing the performance of spatial interpolation techniques for mapping soil properties. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.50, n.2, p.97-108, 2006.

SILVA, K. R.; PAIVA, Y. G.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. E. M. Avaliação de interpoladores para a espacialização de variáveis climáticas na bacia do rio Itapemirim-ES. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13., 2007, Florianópolis. **Anais...**, Florianópolis: INPE, 2007. p. 3141-3146.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo: tópicos em ciência do solo. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.6, p.1-54, 2000.