

## GEOESTATÍSTICA APLICADA À ESPACIALIZAÇÃO DA PRECIPITAÇÃO<sup>1</sup>

SILVESTRE, Miriam Rodrigues<sup>2</sup>; FLORES, Edilson Ferreira<sup>3</sup>; SANT'ANNA NETO, João Lima<sup>4</sup>

### RESUMO

A espacialização de determinado elemento climático a partir de pontos amostrais coletados é uma tarefa usual na Climatologia. Entretanto, os fenômenos geralmente apresentam-se correlacionados espacialmente de maneira que há a necessidade de utilizar um método de interpolação que considere a presença de correlação entre as observações realizadas. A Geoestatística é uma técnica capaz de incorporar a correlação espacial em seus procedimentos, sendo, portanto, bastante empregada em diversas áreas. Porém, nem sempre os passos exigidos no emprego da técnica são seguidos por seus usuários, fazendo com que os mapas produzidos sem o cuidado com sua aplicação possam não ser representações condizentes com a representação real do fenômeno no espaço. Dessa forma, esse artigo objetiva apresentar a teoria da técnica Geoestatística e ilustrar como uma análise deve ser realizada seguindo todos os passos que a técnica preconiza, através de dois exemplos de aplicação em dados de precipitação para a vertente paranaense da bacia do Paranapanema. Os resultados apresentados são obtidos por meio dos softwares Variowin® 2.21 e ArcMap® 10.1, e avaliados por meio da estatística raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM).

**Palavras-chave:** interpolação espacial, geoestatística, krigagem ordinária, precipitação, climatologia.

## GEOESTADÍSTICA APLICADA A LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA PRECIPITACIÓN

### RESÚMEN

La distribución espacial de cierto elemento climático de puntos de muestra recogidos es una tarea habitual en la climatología. Sin embargo, el fenómeno en general presenta correlacionada espacialmente de manera que existe la necesidad de utilizar un método de interpolación que considere la presencia de correlación entre las observaciones. Geoestadística es una técnica capaz de incorporar la correlación espacial en sus procedimientos, y por lo tanto bastante utilizado en varias áreas. Pero no siempre los pasos requeridos en el empleo técnica son seguidos por sus usuarios, por lo que los mapas producidos sin el cuidado de su aplicación no puede ser representaciones consistentes con la representación real del fenómeno en el espacio. Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo presentar la teoría de la técnica geoestadística e ilustrar cómo el análisis debe realizarse siguiendo todos los pasos que la técnica de llamadas a través de dos ejemplos de aplicación en los datos de precipitación para la rama de la cuenca Paraná Paranapanema. Los resultados se obtuvieron a través de Variowin® 2.21 y el software ArcMap® 10.1, y evaluados por el cuadrado medio del error estadístico de la raíz cuadrada (RMSE).

**Palabras clave:** interpolación espacial, geoestadística, kriging ordinario, la precipitación, climatología.

## GEOSTATISTICS APPLIED TO SPATIAL DISTRIBUTION OF THE PRECIPITATION

### ABSTRACT

The spatial distribution of certain climatic element from collected sample points is a usual task in Climatology. However, the phenomenon generally presents spatially correlated so that there is a need to use an interpolation method that considers the presence of correlation between observations. Geostatistics is a technique capable of incorporating the spatial correlation in its procedures, and therefore quite used in several areas. But not always the steps required in technical employment are followed by their users, making the maps produced without the care of their application can not be representations consistent with the actual representation of the phenomenon in space. Thus, this paper aims to present the theory of geostatistics technique and illustrate how an analysis should be performed following all the steps that the technique calls through two examples of application in rainfall data for the Paraná branch of Paranapanema basin. The

<sup>1</sup> Artigo elaborado como resultado de pesquisa de doutorado da primeira autora.

<sup>2</sup> Professora Doutora do Departamento de Estatística da UNESP, Campus de Presidente Prudente. Email: miriam@fct.unesp.br

<sup>3</sup> Professor Doutor do Departamento de Estatística da UNESP, Campus de Presidente Prudente. Email: efflores@fct.unesp.br

<sup>4</sup> Professor Doutor de Graduação e Pós-Graduação do Departamento de Geografia da UNESP, Campus de Presidente Prudente. Email: jlsn57@uol.com.br

results are obtained through Variowin® 2.21 and ArcMap® 10.1 software, and evaluated by the statistical mean square error of the square root (RMSE).

**Key words:** spatial interpolation, geostatistics, ordinary kriging, precipitation, climatology.

## 1. Introdução

Para representar a variabilidade espacial de um elemento do clima é geralmente utilizado um mapa de isolinhas, porém, é necessário que se aplique algum procedimento para realizar a interpolação dos dados. A interpolação espacial é uma técnica utilizada para se estimar valores de locais que não foram amostrados, através do uso de valores de dados observados em locais conhecidos.

Existem diversos procedimentos utilizados para realizar a tarefa de interpolação espacial, entretanto, devido às características dos elementos do clima e do relevo, pontos mais próximos apresentam valores mais parecidos que pontos mais distantes, indicando que, geralmente, os valores observados nos pontos amostrados podem ser considerados correlacionados. Devido a esse fato, a aplicação da técnica de interpolação denominada Geoestatística é indicada por ser um procedimento capaz de capturar a correlação espacial existente entre as amostras.

No levantamento bibliográfico realizado por Silvestre (2016) nos anais dos II, IX e XI Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica (SBCG) e nos volumes 1 a 13 da Revista Brasileira de Climatologia (RBClima), constatou-se nos trabalhos e artigos apresentados que houve um aumento na aplicação da Geoestatística no decorrer dos eventos e volumes, sendo a mesma empregada para realizar a interpolação de dados espaciais. No entanto, observou-se em alguns dos trabalhos que a técnica não era aplicada de acordo com os procedimentos necessários.

O objetivo desse trabalho é apresentar a técnica geoestatística, a qual é bastante utilizada para a interpolação de dados espacialmente distribuídos, pelo método de estimação da krigagem ordinária. Será apresentado um roteiro das principais etapas de execução dessa metodologia através da análise de dois conjuntos de dados referentes à espacialização da precipitação na vertente paranaense da Bacia do Rio Paranapanema para os anos agrícolas seco (1999/00) e chuvoso (2009/10).

## 2. Geoestatística

A análise espacial para dados regionalizados foi desenvolvida primeiramente na África do Sul, na década de 1950, para o cálculo de reservas minerais pelo engenheiro de minas Daniel G. Krige em conjunto com o estatístico H. S. Sichel. Posteriormente, em 1967, a técnica até então empírica, recebeu um tratamento formal adequado por Matheron na França, à qual denominou de Geoestatística. O termo Krigagem, em homenagem a Krige, abrange vários algoritmos: Krigagem Simples, Krigagem da Média, Krigagem Universal e Krigagem Ordinária.

Yamamoto e Landim (2013, p. 55) afirmam a superioridade das técnicas de Krigagem em comparação com outras técnicas de interpolação numérica, porque “fazem uso da função variograma, que não é simplesmente uma função da distância entre pontos, mas depende da existência ou não do efeito pepita, da amplitude e da presença de anisotropia”. Porém, esses autores afirmam que “na impossibilidade de obtenção de um modelo de correlação espacial, métodos de interpolação não estocásticos, que não necessitam do variograma, podem ser considerados”. Como não estocásticos pode-se considerar os métodos determinísticos, como por exemplo: Inverso da Distância Ponderado (IDW), do inglês *Inverse Distance Weighting*, Interpolação Polinomial Global (GPI), do inglês *Global Polynomial Interpolation*, Funções de Rede de Base Radial (RBF), do inglês *Radial Base Functions*, e Interpolação Polinomial Local (LPI), do inglês *Local Polynomial Interpolation*.

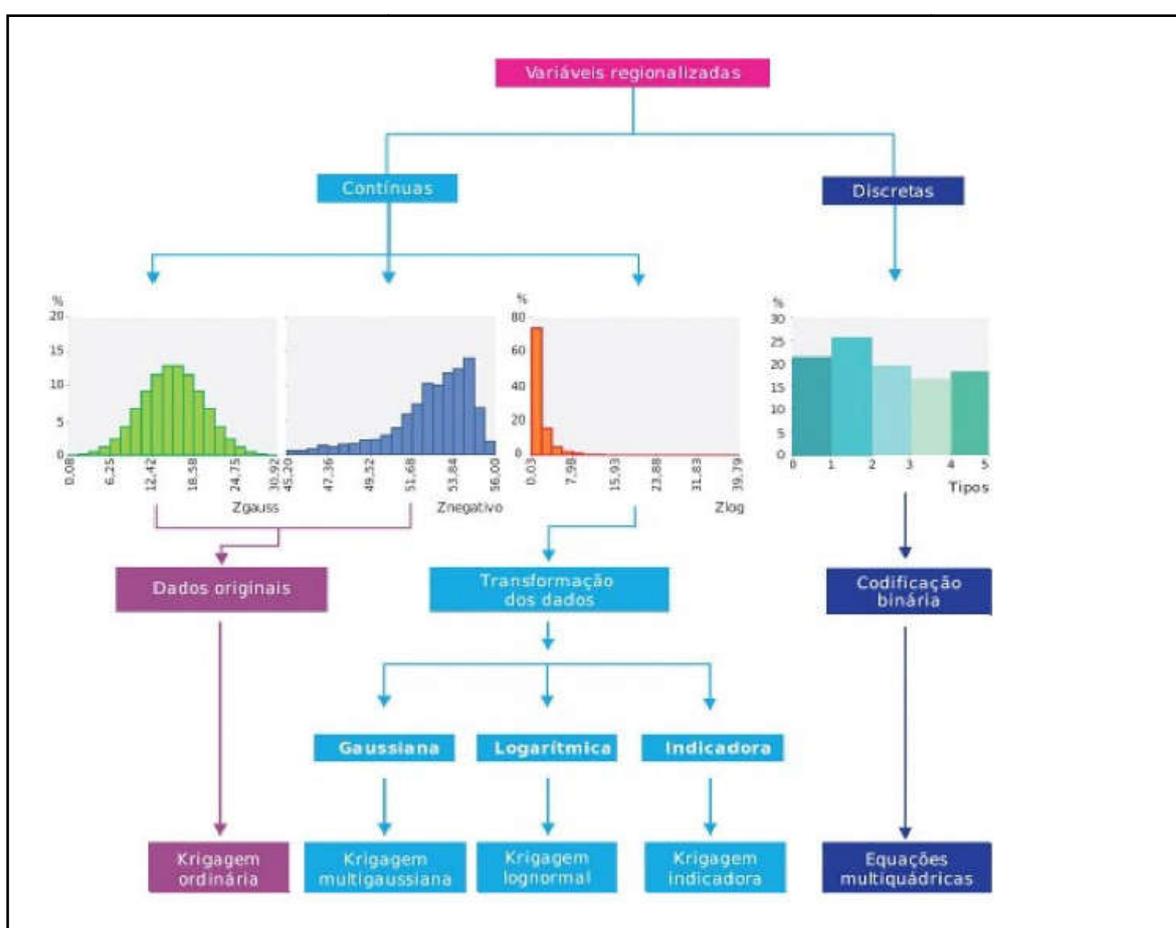
Alves, Biudes e Vecchia (2012), no âmbito da climatologia urbana, avaliaram o desempenho de diferentes métodos de interpolação para a construção de mapas para a identificação de ilhas de calor. O experimento consistiu na obtenção de dados para a temperatura do ar no campus de Cuiabá da Universidade Federal de Mato Grosso. Para isso foram realizadas coletas de temperatura do ar entre os dias 23 e 27 de abril de 2010. Os autores avaliaram onze métodos de interpolação, através de testes estatísticos, e concluíram que a Krigagem apresentou-se como um ótimo método de interpolação.

O artigo de Castro et al. (2010) fez uma avaliação estatística mais detalhada e comparou os métodos de Krigagem e Inverso da Potência da Distância (IPD). Os autores utilizaram dados de temperatura do ar e precipitação pluviométrica, do período de 1977 a 2006, para o cálculo do balanço hídrico, e as variáveis para as quais foram aplicadas as técnicas de interpolação foram os valores médios anuais de: precipitação, deficiência hídrica, excedente hídrico, evapotranspiração potencial, evapotranspiração real e disponibilidade hídrica do estado do Espírito Santo. Os autores concluíram que:

Os resultados mostram que o método da krigagem é o mais eficiente para a espacialização dos parâmetros climáticos, baseado no menor valor da Raiz

do Erro Médio Quadrático (REMQ) e outros parâmetros calculados que auxiliaram na escolha do melhor modelo. (CASTRO, et al., 2010, grifo nosso).

O estudo de uma variável regionalizada deve iniciar pela avaliação sobre o tipo de variável que ela é (discreta ou contínua) e do formato de sua distribuição (simétrica, assimétrica à esquerda ou à direita). Dependendo do tipo e formato da variável regionalizada original, para se utilizar a técnica de Krigagem pode ser necessário realizar alguma transformação, que nada mais é do que aplicar uma função matemática específica aos dados originais. A Figura 1 ilustra as situações que podem ocorrer em relação à distribuição das observações de uma variável regionalizada, e das transformações que devem ser aplicadas, caso necessário.



**Figura 1:** Esquema do processo de estimativa geoestatística ou interpolação de variáveis regionalizadas. **Fonte:** YAMAMOTO; LANDIM (2013, p. 57).

Observa-se na Figura 1 que, dependendo do tipo da variável regionalizada e de sua distribuição tem-se uma das três situações:

- a variável regionalizada é contínua e a distribuição dos dados é simétrica ou assimétrica à esquerda, e nesse caso, pode ser aplicada a Krigagem Ordinária diretamente sobre os dados originais;
- a variável regionalizada é contínua e a distribuição dos dados é assimétrica à direita, é necessário aplicar uma transformação, através de uma das funções indicadas: normal ou gaussiana, lognormal ou indicadora;
- a variável regionalizada é do tipo discreta categórica, seus valores são as categorias as quais os dados pertencem, deve-se realizar a codificação binária, e cada categoria que compõe a variável discreta é interpolado usando as equações multiquádricas, as quais, segundo Yamamoto e Landim (2013, p. 109), foram generalizadas e denominadas Funções de Base Radial.

A variável aleatória estudada em Geoestatística é geralmente denotada por  $Z$ , e denominada variável regionalizada devido ao fato de cada observação  $x_i$  da variável  $Z$  estar associada a uma posição geográfica, representada pelo par de coordenadas  $(x_i, y_i)$ , referentes a latitude e longitude, no caso do fenômeno estar definido no  $R^2$ . Como exemplos de variáveis regionalizadas contínuas podem ser consideradas: a precipitação anual, a temperatura média e a umidade relativa de uma determinada região.

Na Geoestatística é assumido que pontos mais próximos tendem a ter valores mais parecidos e pontos mais distantes apresentam valores mais discrepantes entre si. Portanto, a distância entre os pontos, denotada por  $h$ , é de grande importância para a construção dos modelos geoestatísticos. E a função que avalia a variância entre os pontos é chamada variograma.

O variograma depende da distância  $h$ , e pode ser definido como:

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2\} = \text{Var}[Z(x_i + h) - Z(x_i)] . \quad (1)$$

Entretanto, o semivariograma é mais utilizado na área, e é definido como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E\{[Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2\} = \frac{1}{2} \text{Var}[Z(x_i + h) - Z(x_i)] . \quad (2)$$

Considerando  $n_h$  o número de pares de pontos separados entre si por uma distância  $h$ , a equação acima pode ser reescrita como:

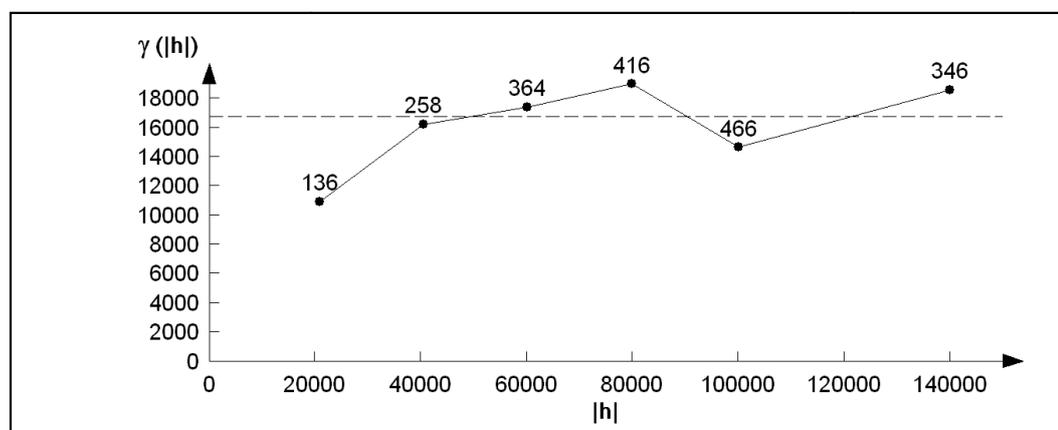
$$\gamma(h) = \frac{1}{2n_h} \sum_{i=1}^{n_h} [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 . \quad (3)$$

A análise geoestatística depende da construção de um gráfico denominado “semivariograma”, o qual é construído utilizando-se diferentes valores para a distância  $h$

no eixo horizontal (das abcissas) e dos valores calculados para o semivariograma,  $\gamma(h)$ , no eixo vertical (das ordenadas), a partir de cada valor considerado para  $h$ .

Para a construção do semivariograma, deve-se adotar para o máximo valor de  $h$  metade da maior distância entre os pares de pontos, e escolher uma direção para o cálculo de  $\gamma(h)$ .

A Figura 2 ilustra um exemplo de gráfico semivariograma, e o número de pares de pontos considerados para cada distância  $h$  considerada. Foram coletados  $n=89$  pontos amostrais, e do total de 3916 pares que podem ser formados, somente um número bem reduzido desses são incluídos no cálculo de  $\gamma(|h|)$  para a direção escolhida: para  $|h|=20000$ , há  $n_h=136$  pares de pontos, para  $|h|=40000$ , há  $n_h=258$  pares, e assim por diante.



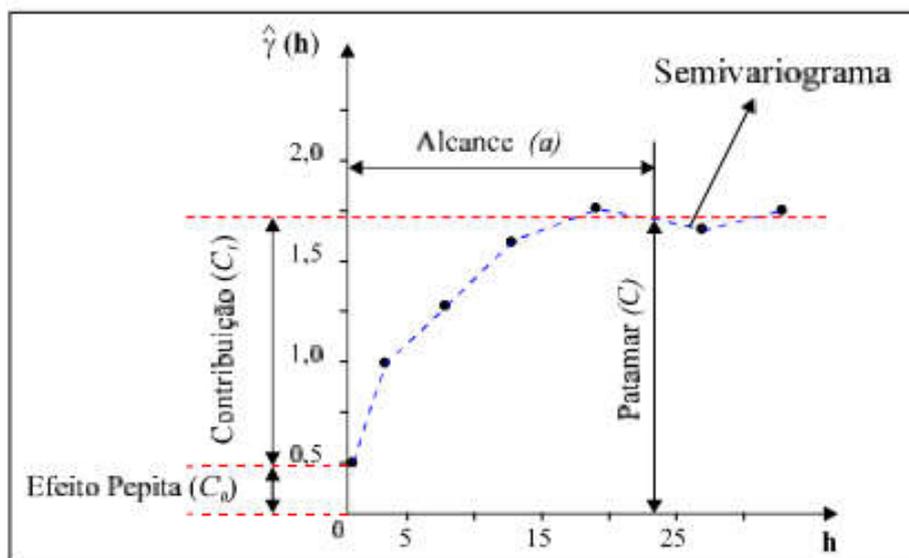
**Figura 2:** Exemplo de um gráfico semivariograma e do número de pares de pontos considerados, segundo a distância  $h$  e a direção escolhida.

**Fonte:** SILVESTRE (2016, p. 230).

Um semivariograma é composto dos seguintes elementos:

- alcance (*range*), denotado por  $a$ : distância dentro da qual as amostras são correlacionadas espacialmente. A partir do alcance, diz-se que não há mais dependência espacial entre as amostras;
- efeito pepita (*nugget*), denotado por  $C_0$ : é por definição  $\gamma(0) = 0$ , à medida em que  $h$  tende para zero,  $\gamma(h)$  se aproxima de um valor positivo chamado “efeito pepita”;
- patamar (*sill*), denotado por  $C$ : é o valor do semivariograma obtido para o alcance  $a$ , sendo que a partir do alcance  $a$ , não há mais correlação entre as amostras. Nessa definição considera-se  $C = C_1 + C_0$ ;
- contribuição, denotada por  $C_1$ : é a diferença entre o patamar  $C$  e o efeito pepita  $C_0$ . Entretanto, convém destacar que alguns softwares consideram o valor do *sill* apenas como  $C_1$ .

Um exemplo de semivariograma e seus componentes é apresentado na Figura 3.



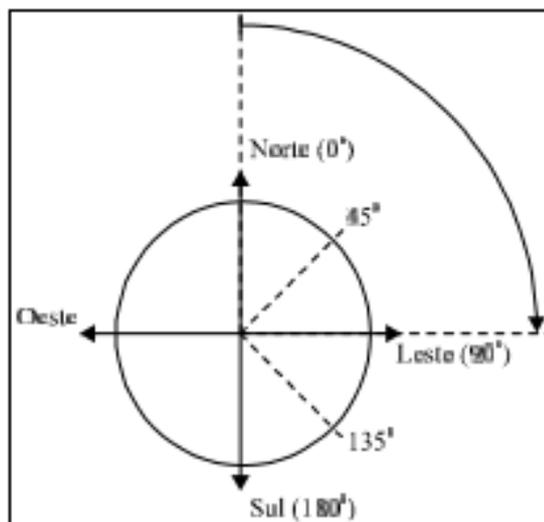
**Figura 3:** Exemplo de semivariograma e seus componentes.  
**Fonte:** CAMARGO (1997, p. 13).

Quando o semivariograma apresenta o mesmo comportamento para qualquer direção de  $h$ , é chamado de **isotrópico**. Quando há diferença em alguma direção de  $h$ , o semivariograma é chamado de **anisotrópico**, nesse caso, o semivariograma apresenta valores estimados para o patamar, efeito pepita e alcance que produzem um modelo diferente dependendo da direção de  $h$ .

A técnica de geoestatística consiste em primeiramente construir um semivariograma omnidirecional, como o disposto anteriormente na Figura 3, usando para a construção do mesmo, a direção de  $0^\circ$  e tolerância de  $90^\circ$ .

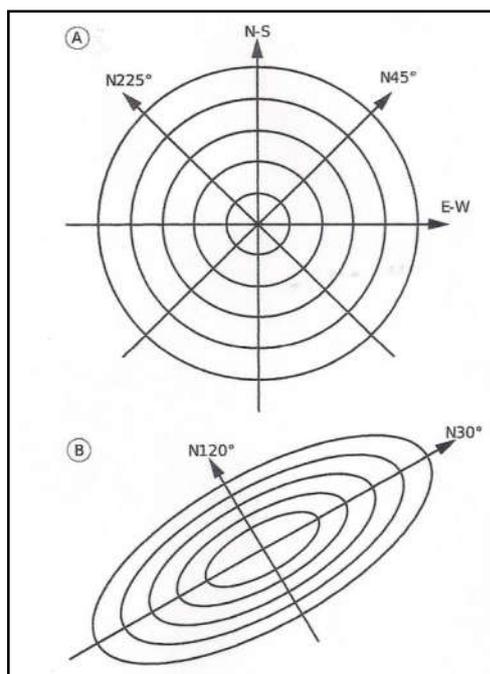
Se o semivariograma omnidirecional não apresentar nenhuma estrutura, diz-se que esse apresenta efeito “pepita puro”, e nesse caso, aconselha-se aplicar técnicas de estatística clássica (modelos de tendências, ou outro método que não necessite da relação de dependência da distância entre os pontos). Também pode ocorrer da distribuição dos pontos amostrais na área de estudo não ter conseguido captar a estrutura de dependência espacial do fenômeno e nesse caso sugere-se realizar uma complementação dos dados amostrais, ou seja, acrescentar novos pontos amostrais aos pontos já existentes, caso seja possível.

Considerando que o semivariograma omnidirecional apresentou alguma estrutura, a seguir devem ser construídos os semivariogramas direcionais nas direções: N-S ( $0^\circ$ ), SW-NE ( $45^\circ$ ), W-E ( $90^\circ$ ), SE-NW ( $135^\circ$ ), conforme ilustra a Figura 4. Após deve ser verificada a existência de isotropia ou de anisotropia em alguma das direções que foram definidas.



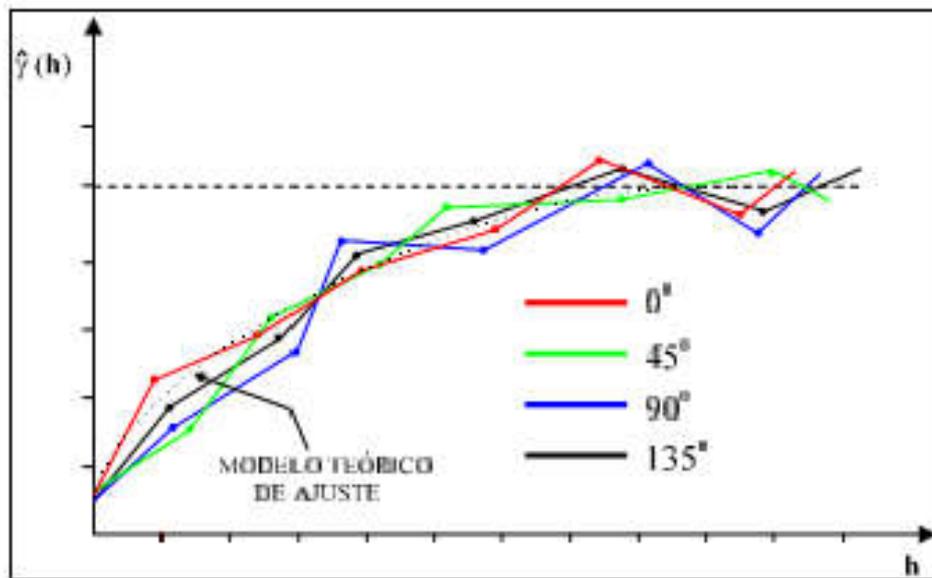
**Figura 4:** Direções usadas em geoestatística.  
**Fonte:** CAMARGO (1997, p. 22).

A Figura 5 apresenta ilustrações do comportamento de fenômenos espaciais isotrópicos e anisotrópicos.



**Figura 5:** Ilustração de um fenômeno espacial: isotrópico (A) e anisotrópico (B).  
**Fonte:** YAMAMOTO; LANDIM (2013, p.34).

Quando há isotropia, os semivariogramas construídos em diferentes direções (0°, 45°, 90° e 135°) apresentam o mesmo comportamento, conforme pode ser observado na Figura 6.

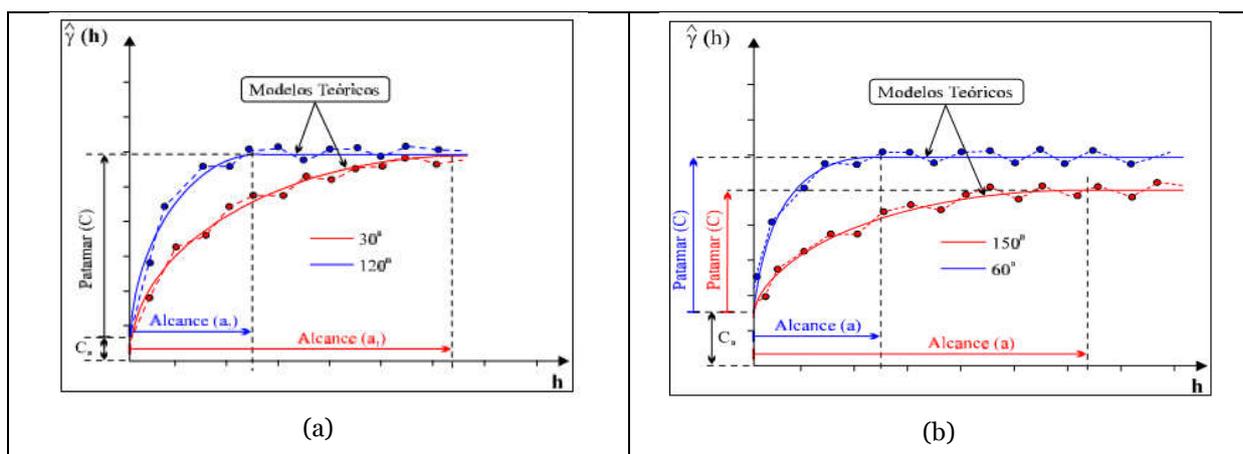


**Figura 6:** Semivariograma isotrópico.  
**Fonte:** CAMARGO (1997, p. 22).

A Figura 7(a) apresenta um exemplo de anisotropia, pois se verifica que o comportamento dos semivariogramas construídos a 30° e a 120° são diferentes. Quando os semivariogramas construídos em diferentes direções têm os mesmos patamares e efeitos pepita, mas diferentes alcances, diz-se que ocorre a “anisotropia geométrica”.

Quando ocorre um tipo de anisotropia diferente da anisotropia geométrica, diz-se que ocorre a “anisotropia zonal”.

Há também outra forma de anisotropia denominada “anisotropia combinada ou mista”, para a qual os modelos teóricos apresentam além de diferentes alcances, também diferentes patamares, como é o caso ilustrado na Figura 7(b).



**Figura 7:** Ilustração de semivariograma com anisotropia geométrica (a) e com anisotropia combinada ou mista (b). **Fonte:** CAMARGO (1997, p. 23 e 25).

A solução para os casos em que há anisotropia depende de seu tipo (geométrica, zonal ou mista), e podem ser encontradas em Yamamoto e Landim (2013, p. 44 e 45), e vão desde fazer a rotação dos dados na direção onde foi detectada a anisotropia (geométrica) a combinar diferentes modelos teóricos de geoestatística em um único modelo (anisotropia mista). O software Variowin® 2.21 permite combinar até 3 modelos.

Para avaliar o grau de aleatoriedade presente nos dados, é indicada a expressão  $E=C_0/C$ , definida em Guerra (1988, apud LANDIM, 2003, p. 179), cuja classificação se dá segundo a escala:

$E < 0,15 \Rightarrow$  componente aleatória pequena (pequena).

$0,15 \leq E \leq 0,30 \Rightarrow$  componente aleatória significativa (significativa).

$E > 0,30 \Rightarrow$  componente aleatória muito significativa (muito significativa).

O grau de dependência espacial também deve ser avaliado para se definir se a aplicação da Krigagem é necessária. A medida mais conhecida para mensurar a dependência espacial é o Índice de Dependência Espacial (IDE), definido por duas propostas como segue:

a) Proposta de Trangmar et al. (1985) e Cambardella et al. (1994):

$$IDE_1 = \frac{C_0}{C_0 + C} \times 100$$

A escala de classificação do índice  $IDE_1$  é definida como:

- $IDE_1 \leq 25\%$  forte dependência espacial (forte);
- $25\% < IDE_1 < 75\%$  moderada dependência espacial (moderada);
- $IDE_1 \geq 75\%$  fraca dependência espacial (fraca).

b) Proposta de Zimback (2001):

$$IDE_2 = \frac{C}{C_0 + C} \times 100$$

A escala de classificação do índice  $IDE_2$  é definida como:

- $IDE_2 = 0$  independência espacial ou efeito pepita puro (nula);
- $IDE_2 \leq 25\%$  fraca dependência espacial (fraca);
- $25\% < IDE_2 < 75\%$  moderada dependência espacial (moderada);
- $75\% \leq IDE_2 \leq 100\%$  forte dependência espacial (forte).

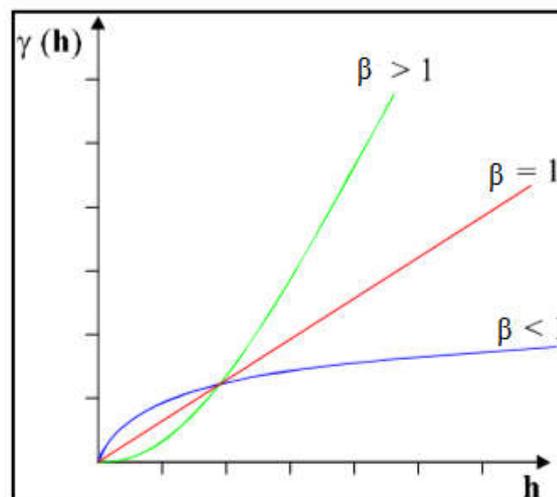
Se alguma das medidas resultarem em indicação de dependência espacial, a krigagem é a técnica adequada para se realizar a interpolação e espacialização; e caso

contrário, sugere-se utilizar outros métodos de interpolação, tais como: inverso da distância (IDW, do inglês *Inverse Distance Weighting*), interpolação global polinomial (GPI, do inglês *Global Polynomial Interpolation*), função de base radial (RBF, do inglês *Radial Basis Functions*) e interpolação local polinomial (LP, do inglês *Local Polynomial Interpolation*).

Há diversos modelos teóricos de variograma que podem ser ajustados aos dados. Yamamoto e Landim (2013) apresentam os seguintes modelos: esférico, exponencial, gaussiano, cúbico, pentaesférico, efeito furo e potencial.

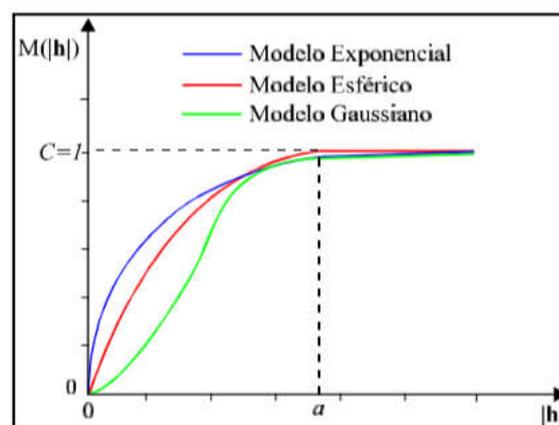
Para o modelo potencial ou de potência, quando  $\beta=1$ , o modelo variograma se torna linear. Quando  $\beta=0$ , o modelo é chamado de “efeito pepita puro”.

A Figura 8 ilustra a aparência do variograma sem patamar, de acordo com os valores de  $\alpha$  e  $\beta$ , e a Figura 9 de diferentes modelos teóricos para variograma com patamar.



**Figura 8:** Representação gráfica do modelo potencial para diferentes valores de  $\beta$ .

**Fonte:** CAMARGO (1997, p. 19).



**Figura 9:** Representação gráfica de modelos teóricos com patamar.

**Fonte:** CAMARGO (1997, p. 18).

### 2.1 Krigagem Ordinária

A Krigagem Ordinária é uma técnica de estimativa linear para uma variável regionalizada. A técnica consiste em, a partir de um conjunto de pontos conhecidos estimar o valor de um ponto, área ou bloco desconhecidos, para o qual é denotado o seu valor desconhecido por  $Z$  e utiliza-se a krigagem para estimar esse valor. O estimador de interesse dependerá do vetor de parâmetros, também conhecidos por pesos, e de um vetor de  $n$  pontos amostrais vizinhos.

### 2.2 Validação Cruzada

O objetivo da validação cruzada, tradução para o português do termo em inglês *cross-validation*, é fornecer informações para que o usuário decida sobre qual modelo fornece previsões mais acuradas. Essa técnica consiste em: 1) omitir um ponto ( $Z_i$ ) do conjunto de dados e estimar o seu valor ( $Z_i^*$ ) através do modelo geoestatístico gerado, 2) calcular os erros cometidos ( $Z_i^* - Z_i$ ). Repete-se esse procedimento para todos os pontos do conjunto de dados e calcula-se uma estatística geral denominada Erro Quadrático Médio (EQM), definida como:

$$EQM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i^* - Z_i)^2, \quad (8)$$

ou a raiz quadrada desse valor, dada por:

$$REQM = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Z_i^* - Z_i)^2}. \quad (9)$$

Um modelo adequado deve apresentar os menores valores possíveis para essas estatísticas.

## 3. Aplicação de Krigagem em dados de precipitação

Nessa seção serão apresentados dois exemplos de aplicação de geoestatística utilizando o método de Krigagem para realizar a interpolação de dados de precipitação, com a preocupação de seguir o roteiro sugerido para a aplicação da técnica. Os exemplos apresentados referem-se aos dados de precipitação total anual de 89 estações da vertente paranaense da bacia do Rio Paranapanema obtidos por Carmello (2013). Por meio da técnica de escolha de anos-padrão, o autor definiu para estudo o ano de 1999/00 como o ano agrícola seco e 2009/10 como o ano chuvoso, e utilizou a técnica de geoestatística para especializar os dados, entretanto, não apresentou todas as etapas da aplicação da técnica, e nem uma análise da adequação da mesma, como será realizada no presente artigo nas seções 3.1 e 3.2 a seguir.

### 3.1 Ano agrícola seco 1999/00

Carmello (2013, p. 28) apresenta na seção 1.3 a metodologia empregada para a elaboração dos mapas, tais como: o método de interpolação utilizado (Krigagem), o modelo adotado (Exponencial e Gaussiano), os valores definidos para os parâmetros do modelo (*nugget* – efeito pepita (Co), *range* – alcance (a), e *sill* – soleira ou patamar (C)), os quais foram obtidos no software Variowin® 2.21, e para a elaboração dos mapas foi utilizado o software ArcGis. A Tabela 1 apresenta os parâmetros do modelo utilizado.

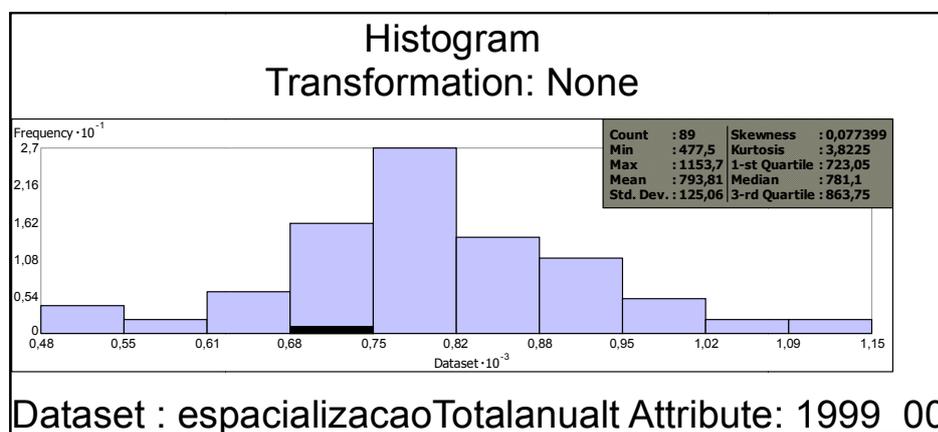
**TABELA 1**

Valores de efeito pepita, alcance, patamar e modelo ajustado para a série de 1999/00.

Ano	Efeito pepita <i>Nugget</i> (Co)	Alcance <i>Range</i> (a)	Patamar <i>Sill</i> (C)	Modelo
1999/00	5120	91000	11680	Exponencial

Fonte: Adaptado de CARMELLO (2013, p. 29). Quadro 2.

O mapa elaborado por Carmello (2013) foi construído a partir da Krigagem Ordinária Omnidirecional (isotropia), porém, em sua dissertação o autor não apresentou todos os passos necessários para a aplicação da técnica de Geoestatística e nesse artigo pretende-se desenvolver mais detalhadamente os passos necessários, realizar a análise semivariográfica incluindo a construção dos variogramas direcionais para que se possa avaliar a existência ou não de anisotropia, para o conjunto de dados, utilizando o modelo geoestatístico apresentado na Tabela 1.



**Figura 10:** Histograma para dados de precipitação total do ano agrícola 1999/00.

Fonte: SILVESTRE (2016).

Primeiramente conforme sugerido por Yamamoto e Landim (2013, p. 57), foi realizada a análise descritiva das 89 observações de precipitação total (mm) referente ao ano agrícola 1999/00 para a região de interesse, para avaliar se os dados originais tinham

as características necessárias para a aplicação da Krigagem Ordinária. O gráfico histograma construído no software ArcMap® 10.1 é apresentado a seguir, na Figura 10.

Observa-se que o histograma apresenta características de uma distribuição simétrica, a estatística de assimetria (Skewness=0,077399) que avalia o nível de assimetria presente nas observações, é bem próxima de zero confirmando a simetria dos dados.

Também foram realizados alguns testes de normalidade no software estatístico Minitab®, já que o ArcMap® 10.1 não apresenta esse tipo de teste. Os testes de normalidade realizados foram: Teste de Anderson-Darling (estatística  $A^2=0,656$  e  $p\text{valor}=0,084$ ), Teste de Ryan-Joiner, similar ao Teste de Shapiro-Wilk (estatística  $R=0,9880$  e  $p\text{valor}=0,0948$ ) e o Teste de Kolmogorov-Smirnov (estatística  $D=0,075$  e  $p\text{valor}>0,15$ ). Observa-se que os pvalores dos testes realizados excedem 0,05, portanto, não se rejeita a hipótese nula de normalidade em nenhum dos testes. Logo, conclui-se que os dados se ajustam adequadamente à distribuição normal.

Como as observações em estudo seguem a distribuição normal, na qual os dados são simétricos é possível aplicar a Krigagem sobre os dados originais, sem necessidade de nenhuma transformação, conforme indica a Figura 1.

O próximo passo foi realizar uma avaliação da qualidade da amostra de 89 estações por meio da análise dos índices E,  $IDE_1$  e  $IDE_2$  para o modelo ajustado por Carmello (2013), os quais foram organizados na Tabela 2, a seguir.

**TABELA 2**

Valores de Efeito Pepita, Patamar, índices E,  $IDE_1$  e  $IDE_2$  para as séries de 1999/00.

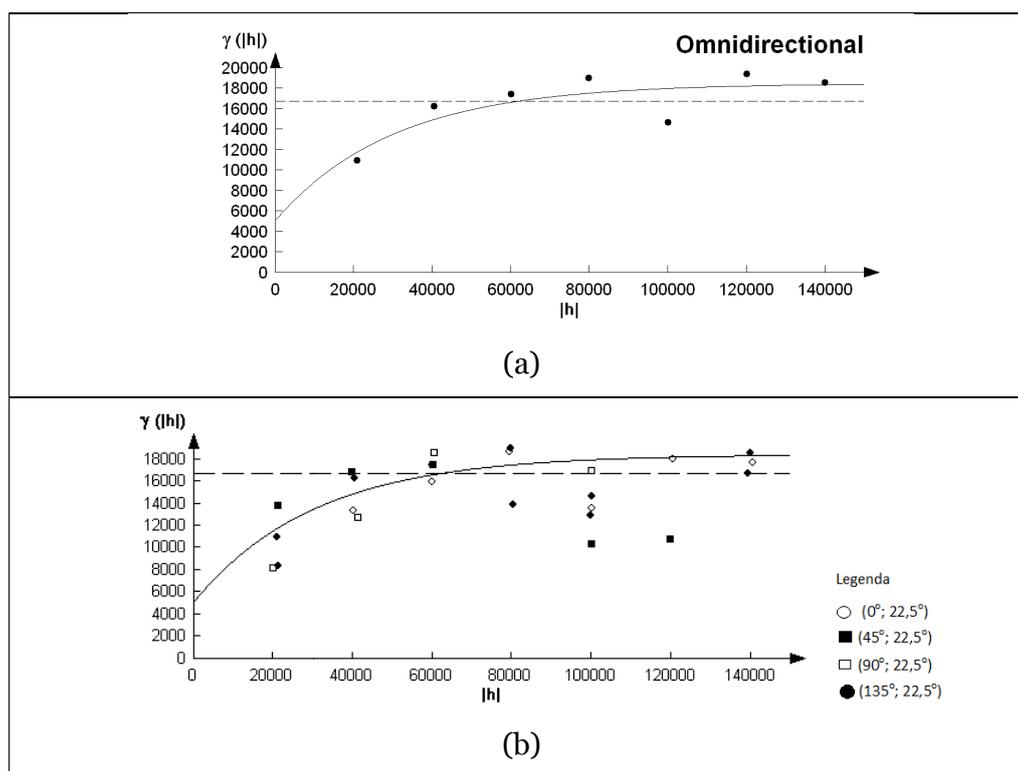
Ano	Efeito Pepita (Co)	Patamar (C)	E (Co/C)	$IDE_1$ Co/(Co+C)x100	$IDE_2$ C/(Co+C)x100
1999/00	5120	11680	0,44 (ams)	30,48 (moderada)	69,52 (moderada)

Fonte: SILVESTRE (2016).

Analisando a Tabela 2, constata-se que para os índices construídos e classificados segundo suas escalas, conclui-se que a amostra apresenta aleatoriedade muito significativa de acordo com o índice E; e os índices  $IDE_1$  e  $IDE_2$  indicam dependência espacial moderada. Portanto, o modelo geoestatístico construído, que possibilita incorporar a dependência espacial, é bastante adequado aos dados de precipitação analisados.

Foi construído o semivariograma experimental no software Variowin® 2.21, e ajustado o modelo exponencial obtido por Carmello (2013). A seguir foram construídos modelos isotrópicos e anisotrópicos no ArcMap® 10.1, usando a opção Otimizada que é executada somente com a solicitação do usuário e que calcula novos valores para os parâmetros, realizando o ajuste com o uso da técnica de validação cruzada iterativa. Os

semivariogramas construídos no software Variowin® 2.21 são apresentados nas Figuras 11 (a) e (b).



**Figura 11:** Semivariograma Omnidirecional (a) e Semivariogramas Direcionais (b).  
**Fonte:** SILVESTRE (2016).

Analisando as Figura 11(a) e (b), conclui-se que os semivariogramas são aparentemente isotrópicos. Portanto, o modelo omnidirecional pode ser utilizado para realizar as estimativas por Krigagem para a espacialização da variável em estudo.

A seguir foi realizado um experimento envolvendo várias opções de Krigagem Ordinária com o objetivo de comparar os resultados dos modelos isotrópicos, anisotrópicos e os softwares Variowin® 2.21 e ArcMap® 10.1. A estatística utilizada para comparação dos modelos quanto à qualidade de ajuste foi a Raiz Quadrada do Erro Quadrático Médio (REQM) ou (RMSE), do inglês *Root-Mean-Square Error*, já apresentada na seção 2.2. Porém, como o Variowin® 2.21 não possui essa estatística implementada, os modelos construídos nesse software foram executados com os mesmos parâmetros, no software ArcMap® 10.1, já que esse último apresenta a estatística REQM.

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos para o ano agrícola seco 1999/00. Destaca-se em negrito o modelo Exponencial Otimizado com o menor valor de REQM. O melhor modelo encontrado segundo a REQM foi o modelo Exponencial Otimizado gerado a partir do modelo de Carmelo (2013). Esse modelo apresentou valores de  $REQM=115,30874897553917$ , tanto considerando isotropia bem como anisotropia.

**TABELA 3**

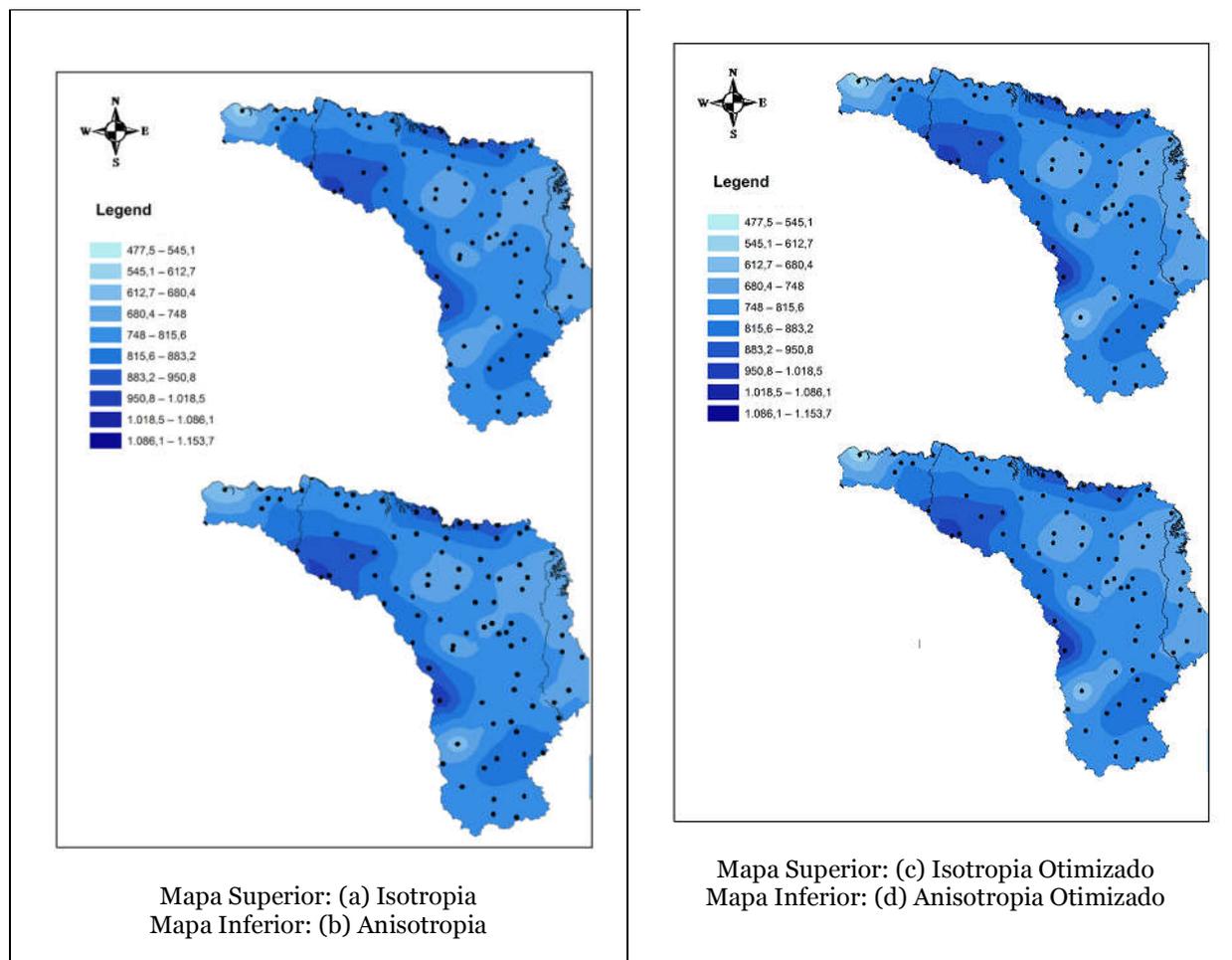
Aplicação de diferentes modelos geoestatísticos, utilizando Krigagem ordinária para o ano agrícola seco 1999/00.

Modelo	Software	REQM para Isotropia	REQM para Anisotropia
Exponencial*	Variowin® 2.21	115,90596239748335	115,89824978366879
Exponencial* Otimizado	ArcMap® 10.1	<b>115,30874897553917</b>	<b>115,30874897553917</b>

\*Modelo gerado por Carmello (2013).

Fonte: SILVESTRE (2016).

Os mapas produzidos pelo ajustamento dos modelos Geoestatísticos de Krigagem Exponencial e Exponencial Otimizado são apresentados nos mapas (a) a (d) da Figura 12.

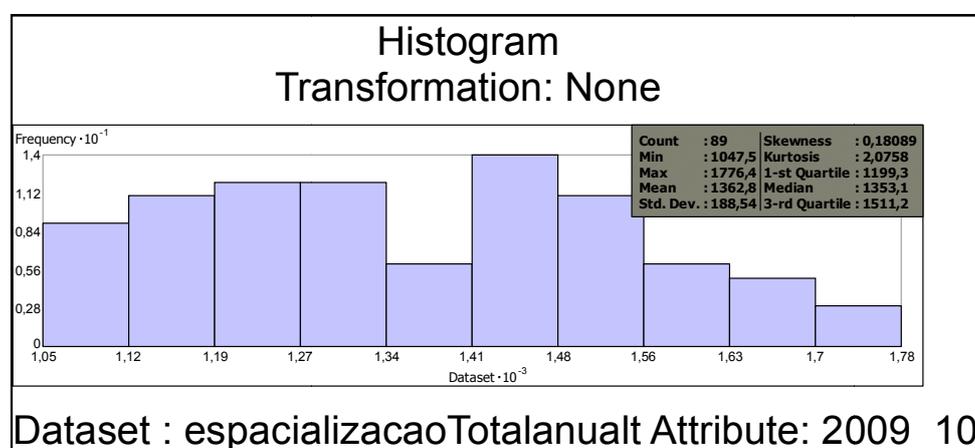


**Figura 12:** Mapas produzidos pelos modelos exponenciais ajustados por Krigagem para o ano agrícola seco 1999/00. Fonte: Adaptado de SILVESTRE (2016).

Analisando os mapas apresentados na Figura 12, nota-se que não há muita diferença entre eles, e as medidas REQM dos modelos gerados são bastante próximas. Porém, os modelos Exponencial Otimizado\* gerados no ArcMap®, mapas (c) e (d) da Figura 12, a partir dos parâmetros do modelo Exponencial Isotrópico gerado no Variowin® apresentam menores valores para REQM.

### 3.2 Ano agrícola chuvoso 2009/10

Primeiramente foi feita a análise descritiva da variável ano agrícola 2009/10, considerando o total de precipitação para as 89 estações consideradas por Carmello (2013). O gráfico Histograma apresenta uma leve assimetria a direita, o que pode ser confirmado pelo valor da estatística ( $Skewness=0,18089>0$ ), apresentado na Figura 13. Porém, a análise de normalidade realizada no software Minitab® indicou a normalidade dos dados pelos Testes de: Anderson-Darling (estatística  $A_2=0,732$  e  $p\text{-valor}=0,0548$ ), Ryan-Joiner (estatística  $R=0,9877$  e  $p\text{-valor}=0,0895$ ) e Kolmogorov-Smirnov (estatísticas  $D=0,079$  e  $p\text{-valor}> 0,15$ ). Como as observações seguem a distribuição normal, na qual os dados são simétricos é possível aplicar a Krigagem diretamente sobre os dados originais, sem necessidade de nenhuma transformação.



**Figura 13:** Histograma para dados de precipitação total do ano agrícola 2009/10.  
**Fonte:** SILVESTRE (2016).

Os semivariogramas construídos no software Variowin® 2.21 são apresentados na Figura 14. Analisando as Figuras 14(a) e (b), conclui-se que os semivariogramas não aparentam ser isotrópicos. Portanto, o modelo omnidirecional não seria muito indicado para realizar as estimativas por Krigagem para a espacialização da variável em estudo. Porém, o modelo isotrópico será construído no Variowin® 2.21, e será apresentado o modelo anisotrópico construído no software ArcMap® 10.1. A estatística REQM será apresentada mais adiante como uma medida mais adequada para indicar qual seria o melhor modelo, isotrópico ou anisotrópico, para esses dados.

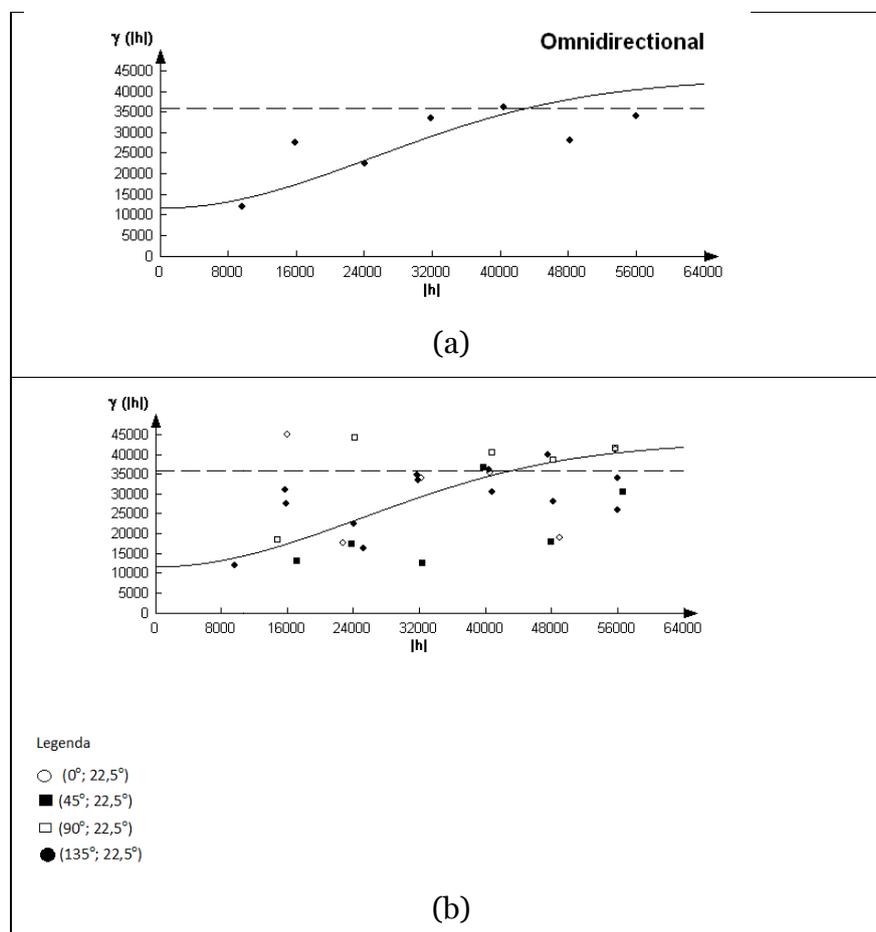
O modelo gaussiano omnidirecional ajustado por Carmello (2013) é apresentado na Tabela 4.

**TABELA 4**

Valores de efeito pepita, alcance, patamar e modelo ajustado para a série de 2009/10.

Ano	Efeito pepita <i>Nugget</i> (Co)	Alcance <i>Range</i> (a)	Patamar <i>Sill</i> (C)	Modelo
2009/10	11880	61060	31320	Gaussiano

Fonte: Adaptado de CARMELLO (2013, p. 29). Quadro 2.



**Figura 14:** Semivariograma Omnidirecional (a) e Semivariogramas Direcionais (b).  
Fonte: SILVESTRE (2016).

Foi avaliada a qualidade da amostra para o ano agrícola chuvoso, por meio da construção e análise dos índices E, IDE<sub>1</sub> e IDE<sub>2</sub> para o modelo omnidirecional ajustado por Carmello (2013). Os resultados foram organizados na Tabela 5, a seguir.

**TABELA 5**

Valores de Efeito Pepita, Patamar, índices E, IDE<sub>1</sub> e IDE<sub>2</sub> para as séries de 2009/10.

Ano	Efeito Pepita (Co)	Patamar (C)	E (Co/C)	IDE <sub>1</sub> Co/(Co+C)x100	IDE <sub>2</sub> C/(Co+C)x100
2009/10	11880	31320	0,38 (ams)	27,50 (moderada)	72,50 (moderada)

Fonte: SILVESTRE (2016).

Analisando a Tabela 5, constata-se que para os índices construídos e classificados segundo suas escalas, conclui-se que a amostra apresenta aleatoriedade muito significativa de acordo com o índice E; e os índices IDE<sub>1</sub> e IDE<sub>2</sub> indicam dependência espacial moderada, o que significa que o modelo geoestatístico construído, que possibilita incorporar a dependência espacial, é adequado aos dados de precipitação do ano chuvoso 2009/10.

A Tabela 6 apresenta os resultados obtidos com a aplicação de modelos isotrópico e anisotrópico. O software ArcMap® 10.1 foi utilizado por apresentar a medida de REQM dos modelos gerados, e permitir que os mesmos sejam comparados quanto à sua qualidade de ajuste. Em negrito destaca-se o modelo Gaussiano Otimizado que apresenta o menor valor de REQM.

**TABELA 6**

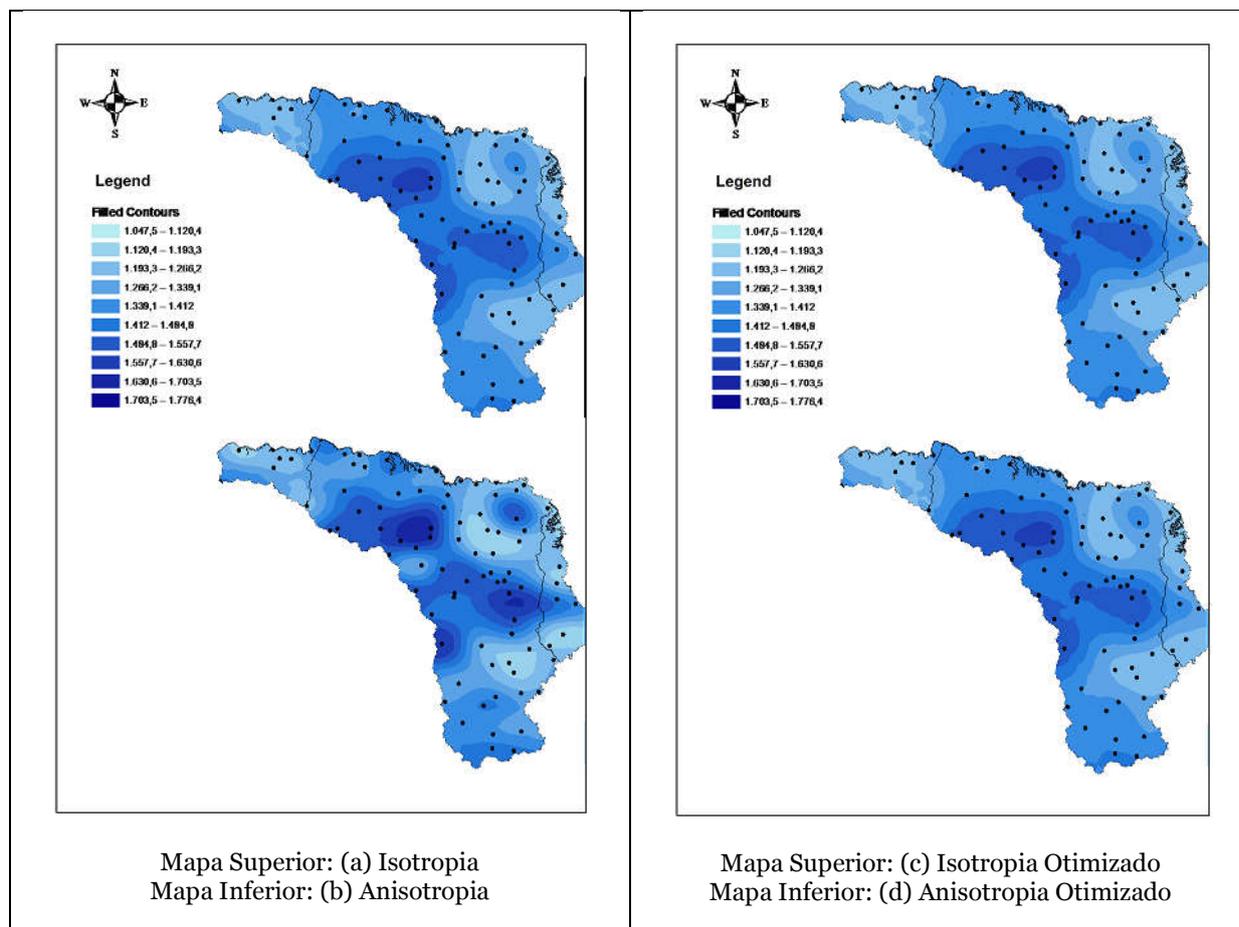
Aplicação de diferentes modelos geoestatísticos, utilizando Krigagem ordinária para o ano agrícola chuvoso 2009/10.

Modelo	Software	REQM para Isotropia	REQM para Anisotropia
Gaussiano*	Variowin® 2.21	183,7032925508392	184,35893644810304
Gaussiano*Otimizado	ArcMap® 10.1	<b>177,15889921957967</b>	<b>177,15889921957967</b>

\*Modelo gerado por Carmello (2013).

**Fonte:** Silvestre (2016).

Os mapas produzidos pelo ajustamento dos modelos Geoestatísticos de Krigagem são apresentados na Figura 15.



**Figura 15:** Mapas produzidos pelos modelos gaussianos ajustados por Krigagem para o ano agrícola chuvoso 2009/10. **Fonte:** Adaptado de SILVESTRE (2016).

Observa-se que praticamente não há diferença entre os mapas 15 (a), (c) e (d) produzidos pelos modelos isotrópico sem otimização e isotrópico e anisotrópico otimizados, já o modelo anisotrópico (b) destaca-se por apresentar uma quantidade bem maior de curvas de níveis e um valor maior que os demais de REQM, não sendo muito adequado quando comparado aos demais.

#### 4. Conclusão

Nesse artigo foi apresentada a técnica de Geoestatística e realizada a sua aplicação em dois conjuntos de dados referentes à precipitação dos anos agrícolas seco 1999/00 e chuvoso 2009/10, na vertente paranaense da Bacia do Paranapanema. A aplicação da técnica foi construída seguindo todos os passos necessários do ponto de vista teórico, desde a análise referente ao tipo de variável em estudo (escala contínua ou não), a forma de distribuição dos dados em relação à existência de simetria ou assimetria (direita ou esquerda), a construção do modelo teórico geoestatístico, a verificação de índices de distribuição espacial para se avaliar a existência ou não de dependência espacial e a

comparação dos modelos construídos por meio de uma estatística apropriada. Com essas informações foi possível verificar que a técnica de Geoestatística foi adequada para realizar a interpolação e espacialização da precipitação na área de estudo.

### Agradecimentos

Os autores agradecem a Vinícius Carmello por ceder os dados referentes à precipitação da vertente paranaense da Bacia do Paranapanema.

### Referências

ALVES, Elis Dener Lima; BIUDES, Marcelo Sacardi; VECCHIA, Francisco Arthur Silva. Interpolação espacial na climatologia: análise dos critérios que precedem sua aplicação. **Revista Geonorte**, Edição Especial 2, v.1, n.5, p. 606 – 618, 2012.

CAMARGO, Eduardo Celso Gerbi. **Desenvolvimento, implementação e teste de procedimentos geoestatísticos (Krigagem) no sistema de processamento de informações georreferenciadas (SPRING)**. 1997. 124f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.

CAMBARDELLA, C. A et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, Sep-Oct 1994.

CARMELLO, Vinícius. **Análise da variabilidade das chuvas e sua relação com a produtividade da soja na vertente paranaense da bacia do rio Paranapanema**. 2013. 123 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

CASTRO, Fábio da S.; PEZZOPANE, José E. M.; CECÍLIO, Roberto A.; PEZZOPANE, José R. M.; XAVIER, Alexandre C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.8, p.871–880, 2010.

GUERRA, P.A.G. (1988). Geoestatística operacional. Brasília: Ministério de Minas e Energia, Departamento Nacional da Produção Mineral, 145p. *In*: LANDIM, Paulo Milton Barbosa. **Análise estatística de dados geológicos**. 2.ed. rev. e ampl. São Paulo: UNESP, 2003. 253p.

LANDIM, Paulo Milton Barbosa. **Análise estatística de dados geológicos**. 2.ed. rev. e ampl. São Paulo: UNESP, 2003. 253p.

LANDIM, P. M. B. **Introdução à análise variográfica com o Variowin**. Lab. Geomatemática. Rio Claro: DGA, IGCE, UNESP, Texto Didático 14, 2004. 25p.

PANNATIER, Yvan. Variowin: software for spacial data analysis in 2D. New York: Springer-Verlag. 1996 apud LANDIM, P. M. B. **Introdução à análise variográfica com o Variowin**. Lab. Geomatemática. Rio Claro: DGA, IGCE, UNESP, Texto Didático 14, 2004. 25p.

ROCHA, Marcelo Monteiro da YAMAMOTO, Jorge Kazuo; FONTELES, Helano Regis da Nóbrega. Cokrigagem ordinária versus krigagem com deriva externa: aplicações para a avaliação do nível potenciométrico em um aquífero livre. **Geologia USP Série Científica**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 73-84, jan. 2009. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/guspssc/article/viewFile/27457/29229>>. Acesso em: 10 set. 2015.

SILVESTRE, Miriam Rodrigues. **Técnicas estatísticas utilizadas em climatologia geográfica**: diagnóstico e propostas. 2016. 409p. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, Orlando, v. 38, n. 1, p. 45-94, 1985.

YAMAMOTO, Jorge Kazuo; LANDIM, Paulo Milton Barbosa. **Geoestatística**: conceitos e aplicações. São Paulo: Oficina de Textos, 2013, 215p.

ZIMBACK, Célia Regina Lopes. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu.

Recebido em 12/04/2016

Aceito em 30/07/2016