



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Krigagem na construção de mapa pluviométrico do Estado de Sergipe

Wellington Jorge Cavalcanti Lundgren¹, Inajá Francisco de Souza², Giovanna Alencar Lundgren³

¹Doutor em Ciências Florestais, Unidade Acadêmica de Serra Talhada UAST, Universidade Federal Rural de Pernambuco, fone: (87)999970748, email: wellingtonlundgren@yahoo.com.br (autor correspondente). ²Doutor em Recursos Naturais. Universidade Federal de Sergipe – UFS, email: inajafrancisco@gmail.com. ³Mestranda em Horticultura, Universidade Estadual Paulista – UNESP. email: giolundgren@gmail.com

Artigo recebido em 5/10/2016 e aceito em 20/12/2016

RESUMO

Previsão de chuvas que incluam informação sobre, quantidade de precipitação, local de ocorrência e época (o tempo em ano, mês ou dia) são sempre variáveis de difícil trato. A maneira usual de apresentação de previsões pluviométricas são os mapas de pluviometria para uma determinada região. Essas apresentações geralmente envolvem doze mapas (isolinhas), um para cada mês do ano. Nessas previsões, duas variáveis explicativas são utilizadas, o tempo, geralmente em mês e a localização geográfica (latitude e longitude). Essa forma de apresentação é trabalhosa e volumosa devido à quantidade de mapas envolvidos. Nesse trabalho, a geoestatística foi utilizada com o objetivo de construir um único mapa, que fornecesse ao mesmo tempo, a quantidade de precipitação, o local e o mês do ano. A quantidade de chuva é estimada usando-se um plano cartesiano não geométrico, ou seja, os eixos com latitude e longitude, foram substituídos por outras duas informações, a distância do local até o mar em linha reta, como abscissa e o mês do ano que se deseja estimar como ordenada. Um semivariograma amostral foi construído, um modelo teórico gaussiano foi ajustado aos dados e foi detectada dependência espacial (DI) forte, igual a 0,94. A krigagem foi utilizada e o mapa construído. A acurácia das previsões de precipitação foram verificadas pela validação cruzada. O gráfico de dispersão, valores observados x valores estimados forneceu $R^2 = 0,8967$ para a equação de regressão linear simples. A krigagem construiu mapa de excelente qualidade fornecendo resultados confiáveis para a precipitação em Sergipe.

Palavras-chave: chuvas, previsão, isolinhas, geoestatística, dependência espacial.

Kriging in the construction of pluviometric map of the State of Sergipe

ABSTRACT

Forecast rainfall that include information, amount of precipitation, place of occurrence and time (the time in year, month and day) are always hard to deal with variables. The usual way of presenting rainfall predictions are the rainfall maps for a given region, these presentations usually involve twelve maps (isolines), one for each month of the year. In these predictions, two explanatory variables are used, the time, usually in the month and geographic location (latitude and longitude). This form of presentation is cumbersome and bulky because the amount of maps involved. In this work geostatistics was used in order to build a single map that provides at the same time, the amount of rainfall, the location and month of the year. The amount of rain is estimated using a non-geometric Cartesian plane, ie, the axes with latitude and longitude, were replaced by two other information, the distance from the location to the sea straight, as abscissa and the month of the year to be estimated as ordered. A sample semivariogram was built, a Gaussian theoretical model was fitted to the data and was detected spatial dependence (DI) strong, equal to 0.94. Kriging was used and the map built, the accuracy of precipitation forecasts were verified by cross-validation. The scatter plot, observed x values estimated values provided $R^2 = 0.8967$ for the linear regression equation. Kriging built excellent quality map providing reliable results for precipitation in Sergipe.

Keywords: rain, forecast, isolines, geostatistics, spatial dependence.

Introdução

A estimativa de ocorrência de chuvas em uma localidade e em determinado período do ano ainda é um problema a ser resolvido quando se deseja uma maior precisão.

Quando a previsão é para períodos curtos e próximos, a acurácia é aceitável, pois existem varias fontes de informações que permitem a realização e o aprimoramento das estimativas. Porém, para períodos mais longos a previsão do volume de chuva fornece resultados, não tão satisfatórios quanto o que se deseja.

Em todos os locais existentes no Brasil ou até mesmo no planeta, as previsões de chuvas são importantes, porém, nos estados brasileiros que possuem territórios dentro da área do semiárido, as previsões de chuvas são cruciais, pois, envolvem diretamente a vida de milhares de sertanejos, já que nessas localidades, o acesso à água é quase sempre preocupação diária de muitas famílias, até mesmo para beber, e principalmente para que consigam colher suas plantações de subsistência.

A manutenção de açudes e barragens depende da acurácia dessas previsões, saber quanto tempo o açude ou barragem será capaz de fornecer água para uma localidade que convive com a seca é informação necessária ao extremo.

Mapas de isolinhas de chuvas têm sido construídos para diversas localidades e paralelamente para diversos períodos de interesse,

Algumas das estações forneceram dados com menos de vinte anos exatamente cinco delas, vinte e seis estações forneceram dados entre $20 < X \leq 40$ anos, em dezoito estações os dados estavam entre $40 < X \leq 60$ anos e vinte e duas estações os dados tinham mais de 60 anos, sendo que em onze delas chegavam a 100 anos de informações.

A distribuição das estações pelo estado de Sergipe não é exatamente homogênea, existe uma maior concentração delas próximo ao oceano, e uma diminuição em direção ao interior.

As posições de algumas das estações pluviométricas estão representadas no mapa de Sergipe apresentado na Figura 1.

A distância entre a estação meteorológica e a beira mar do estado de Sergipe foram medidas usando o site do Google Earth e o seu sistema de medição de distância.

por exemplo, mapas de isolinhas de chuvas para a bacia hidrográfica do rio Mogi Guaçu foram construídos por Alves e Vecchia (2011), eles construíram doze mapas, um para cada mês.

A geoestatística é ferramenta que vem em auxílio da construção de mapas de chuvas, as chuvas são conhecidamente variáveis de difícil previsão.

Prever a data, o local e a quantidade de chuva é tarefa inglória, e muitas vezes desanimadora. Por conta dessa dificuldade tantos mapas de chuvas, (geralmente doze, um para cada mês do ano) são construídos para se realizar previsões de chuvas para uma localidade.

No atual trabalho, a geoestatística foi utilizada para construir um único mapa de isolinhas, em que, para previsão da quantidade de chuva, em um determinado local dentro do Estado de Sergipe, é necessário apenas o conhecimento da distância da localidade até o mar, em linha reta de menor distância, e o mês que se deseja realizar a previsão.

Material e métodos

Os dados foram coletados em setenta e uma estações pluviométricas durante os anos de 1912 e 2012, distribuídas por todo o estado de Sergipe. Os valores são as médias de chuvas mensais. Foram utilizados ao todo 852 pontos amostrais, pois cada uma das estações forneceu informações sobre cada um dos doze meses.

Uma malha de pontos foi construída com a utilização do software Excel, em que a distância em quilômetros, entre a estação meteorológica e a beira mar do estado, em linha reta de menor distância, foi utilizada como a abscissa.

A ordenada foram os meses do ano. Aqui surge um problema de ordem prática. Os meses parecem ser variáveis qualitativas, porém, na verdade eles são variáveis quantitativas contínuas, pois se referem a tempo.

O tempo como variável de influência para atributos de estudo da geoestatística foi objeto de verificação para Biondi et al. (1994), eles verificaram se os parâmetros do semivariograma teórico utilizados na geoestatística variavam para períodos de dez anos em plantios de *Pinus ponderosa*. Quando o atributo de estudo era a altura da árvore. Eles chegaram à conclusão de que a dependência espacial é sim modificada com o passar do tempo.

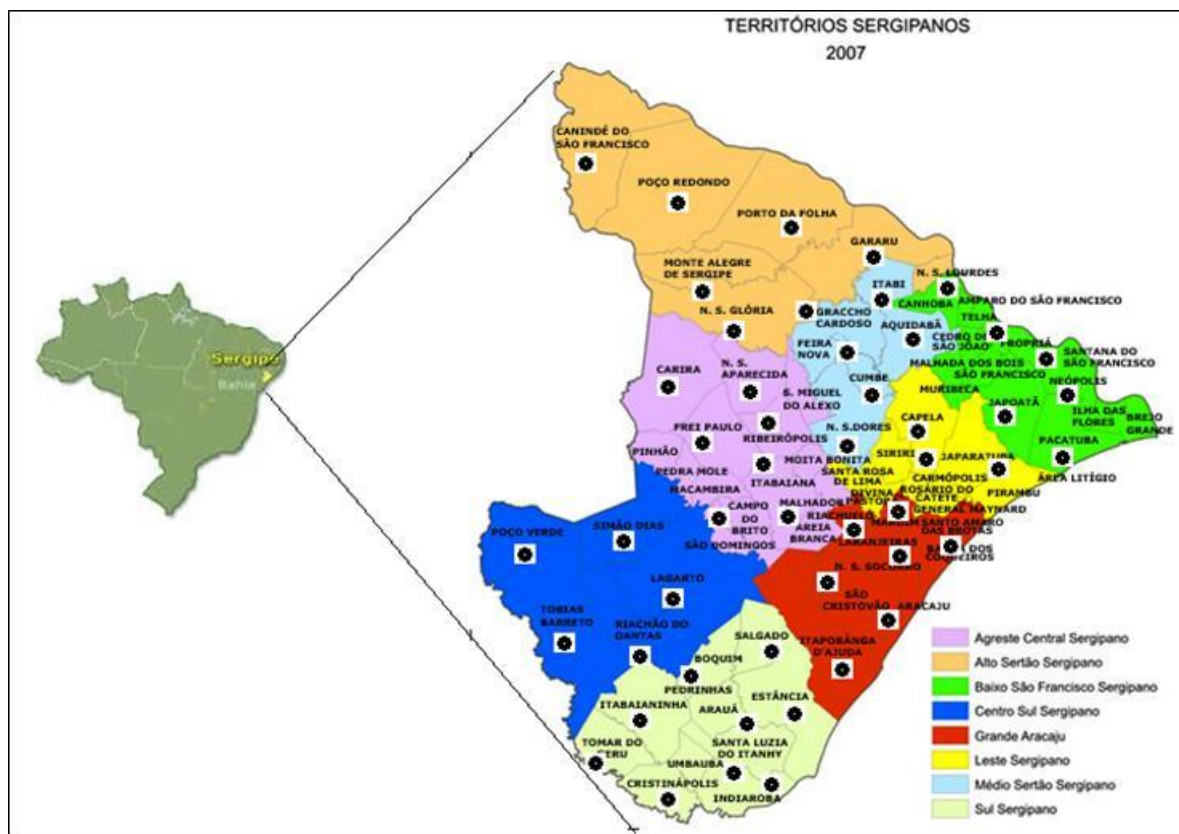


Figura 1. Localização do Estado de Sergipe no Brasil e mapa de Sergipe com algumas estações pluviométricas demarcadas. Mapa do Brasil retirado do site: www.brasil-turismo.com.

A geoestatística foi criada para trabalhar com o tecido (distância, distância), em que a distância pode ser em metro, quilometro, latitude, longitude ou qualquer outra medida desejável.

O mapa construído pelo software GS+ leva em consideração que os dois eixos, abscissa e ordenada, estão na mesma unidade de medida. Para utilizar os meses como números reais, uma adaptação foi realizada, o ano foi adotado com sendo uma linha de tamanho 60(sessenta), de forma que a divisão ($60/12 = 5,00$) corresponde exatamente ao período de um mês.

A divisão em 60 partes foi escolhida para que o mapa construído tivesse a proporção de 180 x 60, em outras palavras, que o mapa tivesse aproximadamente a escala 3 x 1 para os eixos abscissa e ordenada respectivamente, já que a distância máxima entre uma estação meteorológica e a beira mar foi de aproximadamente 180 km.

Os intervalos numéricos e os respectivos meses estão apresentados na Tabela 01.

Tabela 1. Intervalos numéricos e os respectivos meses associados para o eixo da ordenada.

Intervalo numérico	Mês correspondente
0,00 – 5,00	Janeiro
5,00 – 10,00	Fevereiro
10,00 – 15,00	Março
15,00 – 20,00	Abril
20,00 – 25,00	Mai
25,00 – 30,00	Junho
30,00 – 35,00	Julho
35,00 – 40,00	Agosto
40,00 – 45,00	Setembro
45,00 – 50,00	Outubro
50,00 – 55,00	Novembro
55,00 – 60,00	Dezembro

Após a construção do gráfico de dispersão pelo Excel, os valores do eixo vertical foram substituídos pelo nome dos meses.

A malha de pontos pode ser vista na Figura 2. Os dados obtidos então foram triplas ordenadas do tipo (km, mês, mm).

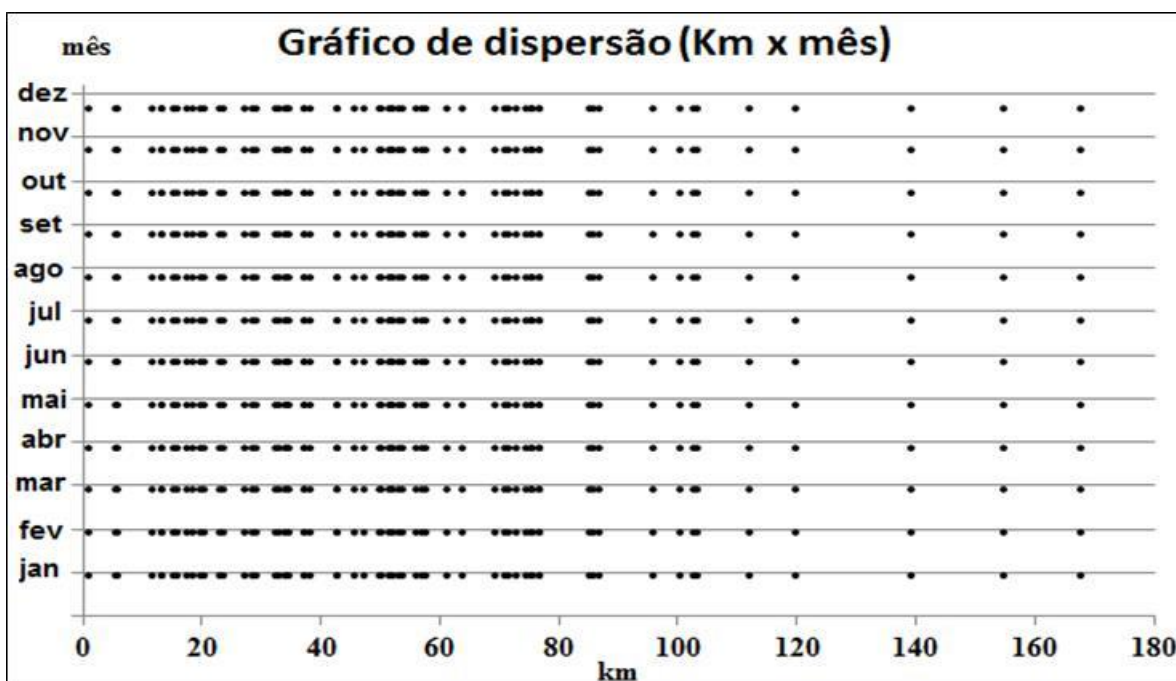


Figura 2. Diagramas de dispersão. Km x mm e Mês x mm

Antes de começar a usar a geoestatística é necessário realizar duas análises prévias dos dados.

a) Teste de normalidade

A primeira análise é verificar a normalidade dos dados, segundo Cressie (1991) a normalidade não é uma característica necessária, ela apenas é desejável, contudo, se os dados apresentarem forte assimetria negativa é necessário tentar uma transformação dos dados visando conseguir a normalidade.

Um histograma para as precipitações foi construído, se o histograma apresentar visualmente assimetria negativa será um indicador da necessidade de transformação dos dados, caso contrário à transformação será descartada.

A normalidade foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ao nível de 5%.

b) Análise de tendência

A segunda análise prévia é a de tendência, se os dados apresentarem tendência, o procedimento descrito por Gonçalves et al. (2001) pode ser utilizado. Nesse procedimento se ajusta um polinômio de primeiro ou segundo grau aos dados plotados em dois diferentes planos cartesianos.

O primeiro plano tem como abscissa os valores do eixo X (no atual artigo à distância em quilômetros da estação até a beira mar) e como ordenada o atributo de interesse, em nosso caso

mm.

O outro plano cartesiano tem o eixo Y (no atual artigo os meses) como abscissa e a ordenada é o atributo, novamente, mm.

Se o R^2 for superior ou igual a 0,7 para qualquer um dos dados plotados nos planos cartesianos anteriormente mencionados, considera-se que existe tendência. É possível corrigir a tendência efetuando-se a diferença entre a estimativa do atributo, conseguida com o polinômio ajustado e o dado amostral, e nesse caso então o semivariograma é construído com os resíduos.

c) Geoestatística

Segundo Isaaks e Srivastava (1989), o conceito principal que norteia a geoestatística é de que dados próximos geograficamente tendem a ter grandezas próximas, se esse fato se comprovar, é dito que existe dependência espacial.

A dependência espacial pode ter sua existência verificada pelo semivariograma amostral ou pelo teórico, que segundo Landim (2006) são os principais instrumentos da geoestatística.

A construção do semivariograma amostral é realizada colocando-se em um gráfico de dispersão, a distância entre os pontos amostrais, apresentados na Figura 3 como abscissa do plano cartesiano, e a semivariância amostral no eixo das ordenadas Landim (2006).

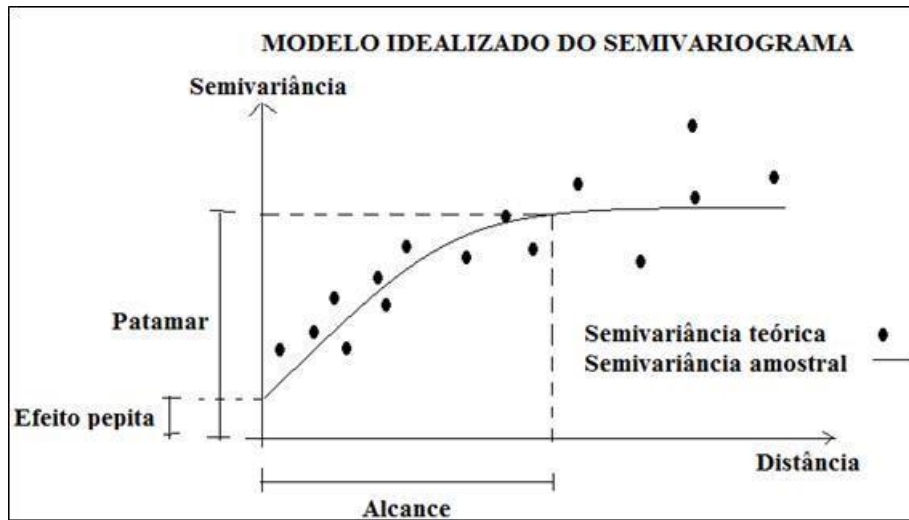


Figura 3. Esquema padrão do semivariograma.

Segundo Mello et al. (2005) a semivariância amostral é calculada pela equação [1].

$$Y(h) = \frac{1}{2 \cdot N(h)} \sum_{i=1}^k (Z_{x_{i+h}} - Z_{x_i})^2 \quad [1]$$

Em que:

Y(h) = semivariância amostral,
 h = distância entre dois pontos x_i ,
 x_i = ponto no plano cartesiano (X, Y),
 Z_{x_i} = valor do atributo no ponto x_i ,
 x_{i+h} = ponto distanciado do ponto x_i pela distância h,
 $Z_{x_{i+h}}$ = valor do atributo no ponto com distância h do ponto x_i ,
 N(h) = número de pares de pontos com a distância h entre eles.

Após a construção do semivariograma amostral uma prévia avaliação visual, é realizada, pois, o semivariograma amostral deve ter a aproximadamente a estrutura apresentada na Figura 3.

O passo seguinte é ajustar um modelo teórico ao semivariograma amostral, Montenegro e Montenegro (2006) afirmam que os modelos mais citados e usados pela literatura são o exponencial, o gaussiano, o esférico e o linear.

Os modelos teóricos possuem três parâmetros que devem ser estimados:

- 1) O Patamar (P), que é o valor da semivariância correspondente ao Alcance.
- 2) O Efeito pepita (C_0), que é o valor da semivariância quando a distância entre os pontos é zero.

- 3) E o Alcance (A), que é a maior distância em que ainda é possível detectar a dependência espacial.

Escolhido o modelo, pode-se quantificar a dependência espacial. Nesse artigo foi adotada a modificação proposta por Cambardella et al. (1994), que calcula a dependência espacial como sendo a diferença entre a unidade e o resultado da divisão do efeito pepita pelo patamar. Essa Equação esta apresentada em [2].

$$DE = 1 - \frac{EP}{P} \quad [2]$$

Em que:

EP = efeito pepita,
 P = patamar
 DE = dependência espacial.

Se, $DE < 0,25$ a dependência espacial é considerada fraca.

Se $0,25 \leq DE < 0,75$ a dependência espacial é dita moderada.

E quando $DE \geq 0,75$ a dependência espacial é forte.

Quando o $DE = 0$ tem-se o efeito pepita puro, ou seja, não foi detectada dependência espacial, e segundo Carvalho et al. (2002) nesse caso não cabe utilizar a geoestatística.

- d) Análise anisotrópica

É preciso verificar se existe anisotropia para a semivariância, a anisotropia esta presente, quando o comportamento da dependência espacial detectada pelo semivariograma teórico, não tem o mesmo comportamento em todas as direções.

Camargo et al. (2001) mostram que a construção de semivariogramas em quatro direções é o método usual de confirmar a anisotropia, quatro semivariogramas são construídos nas direções: 0°, 45°, 90° e 135°, se os parâmetros patamar, efeito pepita e alcance forem muito discrepantes entre os quatro modelos se confirma a anisotropia.

Caso exista a anisotropia, a correção pode ser realizada pela metodologia usada por Rossoni e Lima (2012), eles mostram a importância do ajuste da anisotropia, em que um único semivariograma é ajustado.

Rosa (2003) e Carvalho et al. (2009) ajustaram modelos ao semivariograma amostral usando três métodos: Máxima verossimilhança, Mínimos quadrados e pelo método por sentimento, porém, eles afirmam que o problema com o método da máxima verossimilhança é que ele pressupõe normalidade dos dados, e quando isso não é uma realidade, o método provoca desvios nos resultados.

Nessa pesquisa o método utilizado foi o dos mínimos quadrados que é realizado automaticamente pelo software GS+ com algum ajuste por sentimento quando se achar necessário.

e) Krigagem

Após a escolha do modelo é possível construir o mapa do atributo usando a krigagem, a krigagem permite estimar o valor de um atributo em um local qualquer, apenas tomando o valor do atributo em alguns locais conhecidos e próximos ao local em que o atributo será estimado, Landim (2002) mostra que a função [3] permite realizar a krigagem.

$$Z_{x_0}^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z_{x_i} \quad [3]$$

$$\text{Com a condição de que: } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad [4]$$

Em que:

$Z_{x_0}^*$ = Valor estimado do atributo no local x_0 ,

λ = peso.

i = indicador da amostra, $i = 1, 2, 3, \dots, n$.

Duas premissas permitem que a krigagem seja considerada como um excelente estimador no uso de interpolações, ela é um estimador não tendencioso e ao mesmo tempo possui a variância mínima das estimativas, dois pesquisadores afirmam isso em momentos diferentes, Thompson (1992) e Vieira (2000).

Para medição de erros nas estimativas foi utilizada a validação cruzada, descrita por Alves e Vecchia (2011) como sendo o processo em que após as estimativas, cada ponto é retirado por vez, e as estimativas são novamente realizadas, ponto a ponto.

Após a validação cruzada um gráfico de dispersão é construído com “valores estimados x valores observados” e o coeficiente de determinação é utilizado para quantificar o erro cometido.

Resultados e discussão

O teste de normalidade rejeitou a hipótese de nulidade, o histograma das chuvas foi construído e visualmente é percebido que não existe normalidade, o histograma está apresentado na Figura 4.

Apesar de não haver normalidade nos dados, não foi realizada nenhuma transformação, pois os dados não apresentaram assimetria negativa.

Alguns pesquisadores já trabalharam com dados sem transformação e que não possuíam distribuição normal. Pelissari et al. (2012) construíram mapa por krigagem da altura dominante da árvore Teca, em que a nulidade das alturas dominantes foi rejeitada.

Silva et al. (2010) pesquisando sobre pH do solo em plantios de café, não encontraram normalidade dos dados e construíram mapa de krigagem do pH sem uso de transformação de dados e conseguiram estimativas confiáveis.

A análise de tendência foi efetuada e apresentou baixo coeficiente de determinação para os dados km x mm, $R^2 = 0,16$, não sendo necessário assim realizar correção para esses valores. Para o mês x mm, o $R^2 = 0,44$, apontando que claramente existe uma tendência.

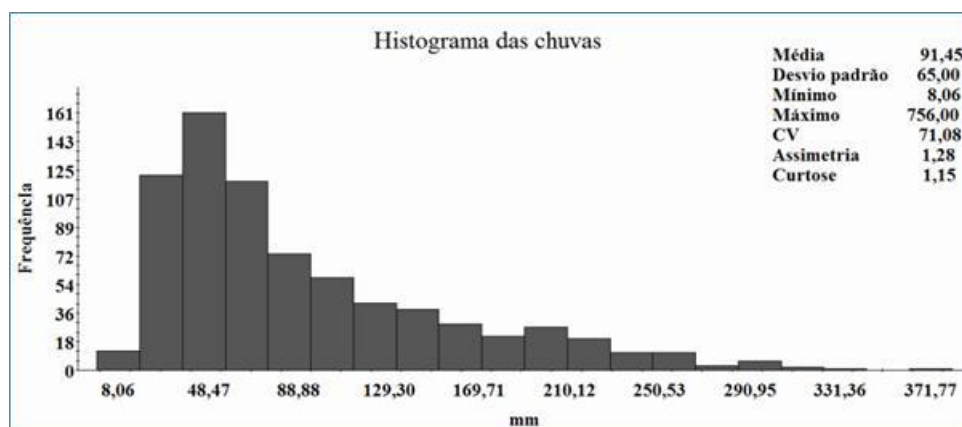


Figura 4. Histograma das chuvas.

Um polinômio de segundo grau pode até ser ajustado, porém apesar de os gráficos mostrarem claramente a existência de tendência para km x mm e para Mês x mm não foi efetuada a correção.

Guimarães (2004) diz que uma amostra grande, pode às vezes por si só, resolver a tendência, não sendo necessário sua retirada, pois

o valor do R^2 geralmente baixa com o aumento amostral, não fornecendo assim confiança na estimativa realizada com os polinômios.

Os diagramas de dispersão para o km x mm e para o mês x mm com os respectivos polinômios ajustados e o coeficiente de determinação estão apresentados na Figura 5.

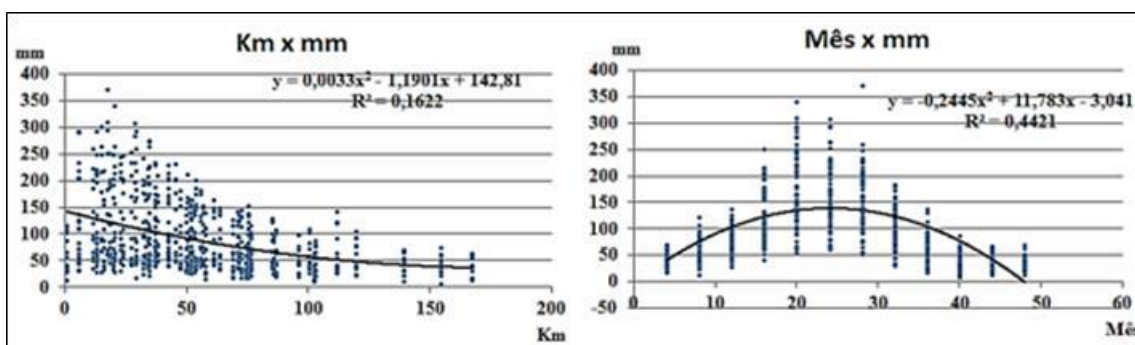


Figura 5. Análise de tendência, km x mm e mês x mm.

Os semivariogramas amostrais e teóricos anisotrópicos foram construídos e estão apresentados na Figura 6.

Nas direções 45° e 135° os comportamentos dos semivariogramas foram idênticos, porém nas direções 0° e 90° tanto o alcance como o patamar foram diferentes entre si, como também foram diferentes, ambos, das direções 45° e 135° configurando anisotropia

combinada.

Na direção 0° a chuva é analisada quanto à distância do ponto amostral até o mar e na direção 90° a dependência espacial foi analisada quando aos meses.

O comportamento das chuvas em relação a 90° , apresentou comportamento de dependência espacial bem diferenciado da direção 0° , comportamento naturalmente esperado.

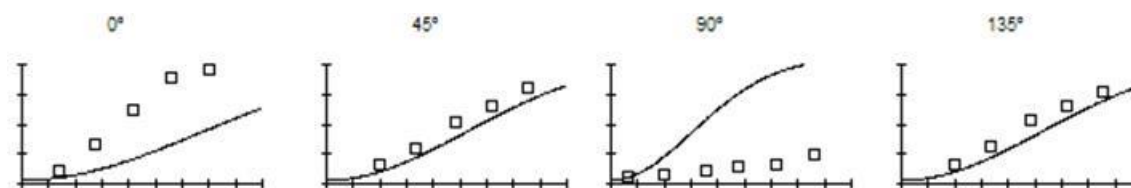


Figura 6. Análise de anisotropia, semivariogramas nas direções, 0° , 45° , 90° e 135°

A correção da anisotropia combinada seguiu o procedimento descrito por Guedes et al.

(2009) em que o semivariograma anisotrópico é construído após rotação e dilatação dos eixos de

coordenadas para corrigir a anisotropia geométrica e para corrigir a anisotropia zonal é construído um variograma equivalente usando o maior patamar encontrado.

O semivariograma anisotrópico teórico tem os seguintes parâmetros, modelo = Gaussiano, efeito pepita = 235, patamar = 8555,34, alcance maior = 27,86, alcance menor = 12,58.

A dependência espacial $DE = 0,973$ é considerada forte, indicando que será possível utilizar sem reservas métodos geoestatísticos, no presente caso a krigagem.

O mapa da chuva construído por krigagem é apresentado na Figura 7. No mapa fica evidente que quanto mais próximo ao oceano, maiores as precipitações, e que essa ao longo de todas as distâncias, se acumulam com máximas entre os meses de março e junho.

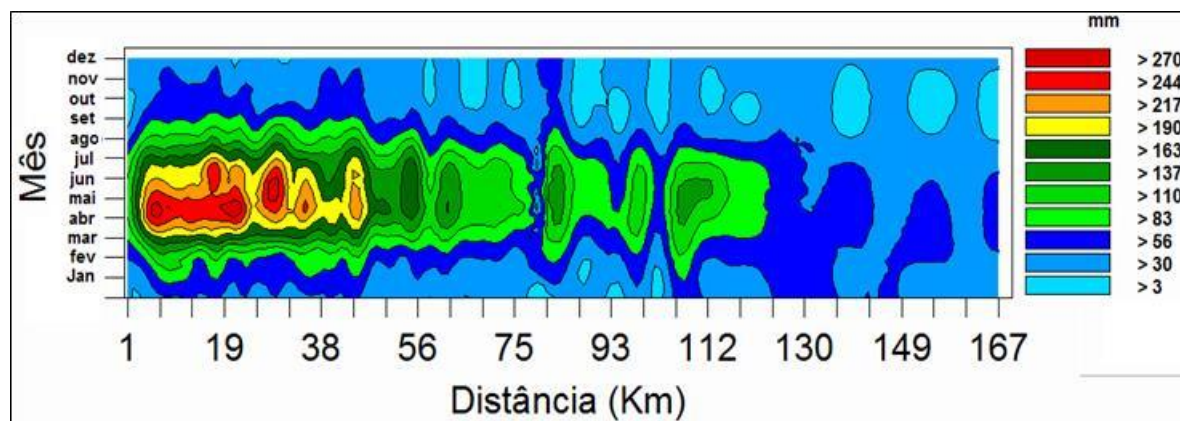


Figura 7. Mapa da chuva (mm) por krigagem.

A vantagem do atual mapa é que a estimativa de chuva em qualquer local do estado de Sergipe pode ser realizada com apenas duas informações, a distância do local para o oceano e o mês que se deseja realizar a estimativa.

Um problema da estimativa de chuva abrangendo todo o Estado de Sergipe pode ser percebido observando-se a Figura 2, nota-se que após 80 km de distância do oceano, o número de amostras vai diminuindo consideravelmente, causando certa insegurança para estimativas realizadas para o alto sertão do estado. Principalmente quando é conhecido que as chuvas nessa região são escassas e irregulares.

Mapas de chuva usando a krigagem foram construídos por Gomes et al. (2011), eles utilizaram a localização geográfica, (latitude, longitude, mm) e construíram doze mapas, um para cada mês para o Estado da Paraíba.

A krigagem é considerada um excelente estimador quando comparada com outros métodos de estimação.

A krigagem e inverso do quadrado foram comparados para estimação de chuvas intensas do Estado de São Paulo, Mello et al. (2003) chegaram à conclusão de que a krigagem produziu estimativas de chuvas com menor erro do que a estimativa do inverso do quadrado.

A krigagem foi comparada com o método do inverso do quadrado por Souza et al. (2010), para atributos do solo, eles afirmam que o mapa construído por inverso do quadrado apresentou maior variabilidade de cores do que o mapa construído por krigagem, porém, por outro lado, para as estimativas dos atributos estudados, não foi possível verificar diferença significativa para as estimações entre os dois métodos.

Silva et al. (2010) compararam três métodos de estimação para pH do solo, inverso do quadrado da distância, polinomial e krigagem, e chegaram à conclusão de que a krigagem forneceu resultados com menores erros do que os outros dois métodos.

A estimativa dos erros foi realizada e esta apresentada na Figura 8. A reta da regressão linear simples que tem equação igual a:

$$mm(\text{verdadeiro}) = 0,9089.(mm\text{ estimado}) + 8,097 \quad [5]$$

Indicando que as estimativas estão muito próximas dos verdadeiros valores, as retas, contínua (reta 1:1) e a tracejada (reta de regressão linear simples), quase que coincidem, a inclinação da reta foi próxima à unidade e o valor do intercepto igual a 8,097 pode ser considerado pequeno, quando associado à grandeza dos

valores do atributo. O valor do coeficiente de determinação foi igual a 0,8967, uma excelente estimativa.

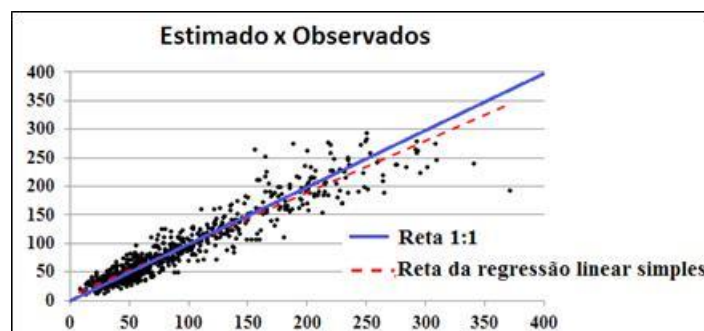


Figura 8. Gráfico de dispersão: Estimados x Observados

Conclusões

- 1) A geoestatística pode ser utilizada com dados amostrais coletados com coordenadas não necessariamente geográficas.
- 2) A chuva apresentou forte dependência espacial para as coordenadas (distância do oceano, mês do ano)
- 3) Mapa de krigagem foi construído para chuva dependendo apenas das informações distância do oceano e mês do ano com excelente precisão.

Referências

- Alves, E.D.L., Vecchia, F.A.S., 2011. Análise de diferentes métodos de interpolação para a precipitação pluvial no Estado de Goiás. *Acta Scientiarum. Human and Social Sciences* 33, 193–197.
- Biondi, F., Myers, D.E., Avery, C.C., 1994. Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. *Canadian Journal of Forest Research* 24, 1354–1368.
- Camargo, E.C.G.; Felgueiras, C.A.; Monteiro, A.M.V., 2001. A importância da modelagem da anisotropia na distribuição espacial de variáveis ambientais utilizando procedimentos geoestatísticos. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Foz de Iguaçu*.
- Cambardella, C.A., Moorman, T.B., Parkin, T.B., Karlen, D.L., Novak, J.M., Turco R.F., Konopka A.E., 1994. Field-Scale Variability of soil properties in Central Iowa Soils. *Soil Science Society of America journal* 58, 1501–1511.
- Carvalho, J.R.P.de, Silveira, P.M.da, Vieira, S.R., 2002. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 37, 1151–1159.
- Carvalho, J.R.P.de, Vieira, S.R., Grego, C.R., 2009. Comparação de métodos para ajuste de modelos de semivariograma da precipitação pluvial anual. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 13, 443–448.
- Cressie, N., 1991. *Statistic for Spatial Data*. New York.
- Gomes, O.M., Souza, F.A.S., Santos, C.A.C., Paiva, W., 2011. Análise geoestatística da precipitação pluvial do Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Geografia Física* 4, 692–702.
- Gonçalves, A.C.A., Folegatti, M.V., Viana, J.deD., 2001. Análises exploratória e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. *Acta Scientiarum Agronomy* 23, 1149–1157.
- Guedes, L.P.C., Uribe-Opazo, M.A., Johann, J.A., Souza, E.G.de, 2009. Anisotropia no estudo da variabilidade espacial de algumas variáveis químicas do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 32, 2217–2226.
- Guimarães, E.C., 2004. *Geoestatística Básica e Aplicada*. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- Isaaks, E.H., Srivastava, M.R., 1989. *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press, New York.
- Landim, P.M.B., 2002. Krigagem ordinária para situações com tendência regionalizada. *Rio Claro*.
- Landim, P.M.B., 2006. Sobre Geoestatística e mapas. *Terra e Didática* 2, 19–33.
- Mello, C.R., Lima, J.M., Silva, A.M., Mello, J.M., Oliveira, M.S., 2003. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas

- intensas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 27, 925-933.
- Mello, J.M.de, Batista, J.L.F., Ribeiro, P.J.O., Oliveira, M.S.de., 2005. Ajuste e seleção de modelos espaciais de semivariograma visando à estimativa volumétrica de *Eucalyptus grandis*. *Scientia Forestalis/Forest Sciences* 69, 25–37.
- Montenegro, A.A.A., Montenegro, S.M.G.L., 2006. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 10, 30–37.
- Pelissari, A.L., Caldeira, S.F., Drescher, R., Santos, V.S., 2012. Modelagem geoestatística da dinâmica espacial da altura dominante de *Tectona grandis* L.f. (teca). *Enciclopédia Biosfera* 8, 1249–1260.
- Rosa, G., 2003. Avaliando a qualidade dos estimadores de variograma (variograma experimental) e do método de mínimos quadrados ponderados para estimação dos parâmetros do modelo de variograma teórico do processo. *Disertação (Mestrado)*. Belo Horizonte, UFMG.
- Rossoni, D.F.; Lima, R.R.de., 2012. A importância da correção da anisotropia em análises geoestatísticas. *Revista de Estatística da Universidade Federal de Ouro Preto* 2, 217–221.
- Silva, A. F.da, Lima, J.S.de, Oliveira, R.B.de., 2010. Métodos de interpolação para estimar o pH em solo sob dois manejos de café arábica. *Idesia (Arica)* 28, 61–66.
- Souza, G.S.de, Lima, J.S.deS., Xavier, A.C., Rocha, W.S.D.da, 2010. Krigagem ordinária e inverso do quadrado da distância aplicados na espacialização de atributos químicos de um argissolo. *Scientia Agraria* 11, 73–81.
- Thompson, S.K., 1992. *Sampling*. Wiley-Interscience Publication, New York.
- Vieira, S.R., 2000. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo, in: Novais, R.F., Alvarez V.H., Schaefer, C.E.G.R. (Eds.), *Tópicos em Ciência do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, pp. 1-54.