



IV - 01 – GEOESTATÍSTICA DA PRECIPITAÇÃO TOTAL UTILIZANDO A LINGUAGEM R

Guilherme Souza de Aquino⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Mestrando em Qualidade Ambiental no PPGMQ/UFU.

José Manuel Rocha⁽²⁾

Geografia e Planejamento pela Universidade do Minho. Mestre Geografia, com especialização em Planejamento e Gestão do Território pela Universidade do Minho. Desenvolve o doutoramento em Geografia, área de especialização em Geografia Física e Estudos Ambientais pela Universidade do Minho, e, também, em Geografia, Planejamento Territorial e Gestão Ambiental, área de especialização em Sistemas Naturais e Mudanças Globais pela Universidade de Barcelona.

Flavya Fernanda França Vilela⁽³⁾

Engenheira Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Mestrando em Qualidade Ambiental no PPGMQ/UFU.

André Afonso Borges de Souza⁽⁴⁾

Engenheira Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Mestrando em Qualidade Ambiental no PPGMQ/UFU.

Endereço⁽¹⁾: Rua Tribuna, 294 - Laranjeiras - Uberlândia - MG - CEP: 38410-532 - Brasil - Tel: (34) 996611510 - e-mail: guilherme_s.a@hotmail.com.br

RESUMO

Este estudo aborda a modelagem geoestatística da precipitação total utilizando a linguagem R, com foco na região do 2º Comando Operacional dos Bombeiros de Minas Gerais. A análise incluiu a aplicação de técnicas como krigagem para estimar os padrões espaciais da precipitação em 2019. Os resultados da validação cruzada demonstraram que o modelo circular no variograma foi adequado para ajustar os dados, permitindo uma representação refinada e detalhada da distribuição da precipitação. A utilização da linguagem R como ferramenta para análise de dados de precipitação proporcionou resultados significativos, destacando a importância da programação na modelagem de fenômenos espaciais.

PALAVRAS-CHAVE: modelagem geoestatística, precipitação, linguagem R, Krigagem, distribuição espacial.

INTRODUÇÃO

A disposição geográfica de fatores climáticos, incluindo a quantidade de chuva, pode ser calculada utilizando métodos de interpolação. Essas técnicas são empregadas para analisar a variação espacial de características específicas com base em informações amostrais coletadas em locais de interesse (PELLICONE, 2018).

O processo de krigagem, uma abordagem geoestatística, é utilizado para prever valores de variáveis distribuídas no espaço e/ou tempo, levando em consideração a interdependência entre os valores adjacentes conforme determinado pela análise variográfica (YAMAMOTO, 2015). Determinar a variabilidade espacial das chuvas é crucial para avaliar o potencial agrícola de uma determinada área e para identificar locais de risco, onde altos níveis de precipitação podem resultar em deslizamentos de terra em encostas (SERVIDONI, 2019).

A análise geoestatística desempenha um papel crucial na compreensão e modelagem de fenômenos espaciais, e a programação em linguagem R emerge como uma ferramenta indispensável nesse contexto. Especificamente, quando se trata da análise de dados de precipitação total de uma região ao longo de um período, a utilização da linguagem R para realizar técnicas como a krigagem é essencial para obter resultados mais significativos (DALL'AGNOL, 2018).



O objetivo deste estudo consiste em empregar a programação em linguagem R para conduzir uma análise da distribuição espacial da precipitação total referente ao ano de 2019, para a área correspondente ao 2º Comando Operacional do Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais, empregando como ferramenta a linguagem de programação R. Este trabalho visa empregar técnicas de modelagem geoestatística, em particular a krigagem, a fim de representar os padrões espaciais inerentes a esses dados pluviométricos.

MATERIAIS E MÉTODOS

PRIMEIRA ETAPA: OBTENÇÃO DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO

Os dados de precipitação utilizados nesta análise foram obtidos a partir das estações meteorológicas localizadas na região de estudo. A escolha específica dessas estações meteorológicas baseou-se em critérios que visam uma representação espacial abrangente da região, buscando capturar a variabilidade da precipitação em diferentes pontos geográficos.

SEGUNDA ETAPA: MODELAGEM GEOESTATÍSTICA

Na fase inicial, antes da modelagem geoestatística, foi realizada uma análise descritiva (máximo, mínimo, média, mediana, variância, desvio padrão e coeficiente de variação) com o objetivo de obter uma compreensão no comportamento dos dados de precipitação. Para caracterizar a distribuição espacial e as tendências nos valores amostrais, foi realizada uma análise das dispersões nas direções (x) e (y), a fim de identificar as orientações predominantes dos dados na área de pesquisa e verificar se existe uma tendência de correlação nos dados.

No âmbito deste estudo, a abordagem da modelagem geoestatística empregada para expandir os resultados, compreende um conjunto de etapas distintas: realização do cálculo e ajuste do semivariograma, aplicação da técnica de Krigagem e procedimento de validação cruzada (LANDIN, 2002).

Os semivariogramas foram modelados mediante a aplicação da fórmula de Matheron (1963) dada pela Equação (1), buscando identificar padrões de estacionariedade em torno da semivariância máxima, denominado de patamar, como ilustra a Figura 1 (YAMAMOTO, 2015).

$$2\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{|N(h)|} \sum_{N(h)} [Z(s_i) - Z(s_j)]^2, h \in \mathfrak{R}^d$$

equação (1)

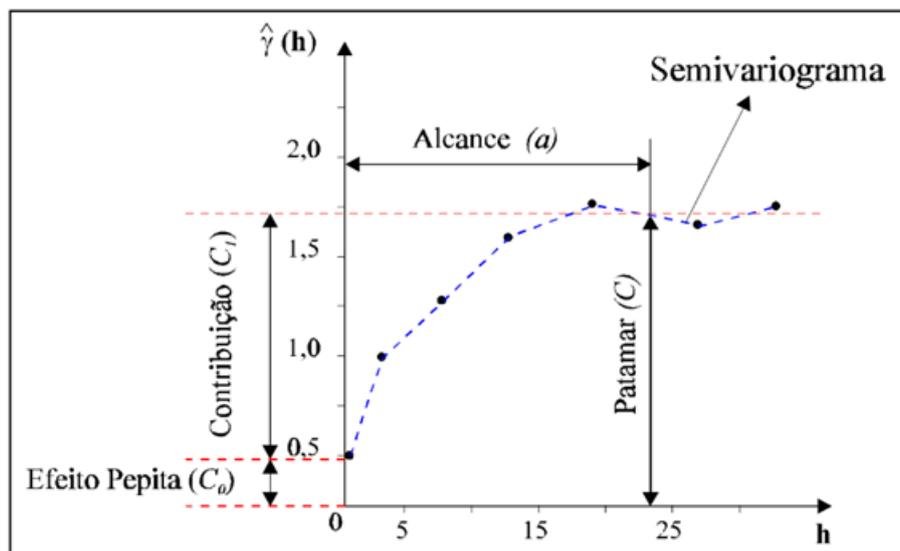




Figura 1: Representação de um semivariograma com os principais parâmetros que são estimados em uma análise geostatística.

Segundo Yamamoto (2015), a partir das semivariâncias calculadas, foi possível determinar o melhor modelo representativo dos semivariogramas, baseado na análise visual conhecida como “a sentimento”.

Posteriormente para a verificação da validade do modelo construído, foi realizado a validação cruzada para cada valor medido $z(x_i)$ extraído do conjunto de dados de precipitação o valor original e realizando uma estimativa $z'(x_i)$ por meio da técnica de krigagem, obtendo-se o gráfico da relação entre valores estimados e observados. O modelo selecionado foi aquele no qual as discrepâncias entre os valores estimados e observados não revelaram significância estatística a um nível de 0.01 de confiança. Por fim, foi realizado a interpolação pelo método de krigagem representando os valores estimando de precipitação dentro da região em estudo, seguindo a Eq. 2:

$$Z^*(s_0) = \sum_{i=1}^k \lambda_i Z(s_i)$$

equação (2)

RESULTADOS

Os resultados da análise espacial e da modelagem dos valores de precipitação são divulgados em múltiplas partes para permitir uma análise mais aprofundada de cada componente do script desenvolvido.

Na implantação dos pacotes, os seguintes comandos foram executados após as instalações dos respectivos pacotes no software R:

```
library(geOR)
library(readxl)
library(fBasics)
```

Para incorporar e extrair os dados de precipitação obtidos pelas estações meteorológicas, foram acionados os seguintes comandos para atribuir os dados para uma variável:

```
setwd("C:/Users/guilhermesa/Desktop/Geral/Dados")
dados<-read_excel("Precipitacao19.xlsx.")
dados
```

Os códigos a seguir foram utilizados para gerar as estatísticas básicas, com o propósito de realizar uma análise aprofundada dos dados de precipitação, conforme demonstrado na Tabela 1 e posteriormente construir o histograma e o gráfico boxplot apresentado na Figura 2, os seguintes comandos foram acionados:

```
basicStats(P)
boxplot(P,
  main="Boxplot",
  horizontal=TRUE,
  xlab = "Precipitação")
hist(P,
  main = "Precipitação anual observada para 2019",
  xlab = "Precipitação", ylab = "Frequência",
  col = c("blue", "blue", "blue", "blue", "blue"),
  border = c("black"),
  right = FALSE)
```

Tabela 1: Estatísticas básicas para o conjunto de dados de precipitação.

Medidas descritivas	Precipitação
Número de amostras	54
Valor máximo	2.411,6



Valor mínimo	380,6
Média	1.124,5
Variância	9.246,3
Desvio Padrão	304,08
1º Quartil	950,6
Mediana (2º Quartil)	1.131,9
3º Quartil	1294,5

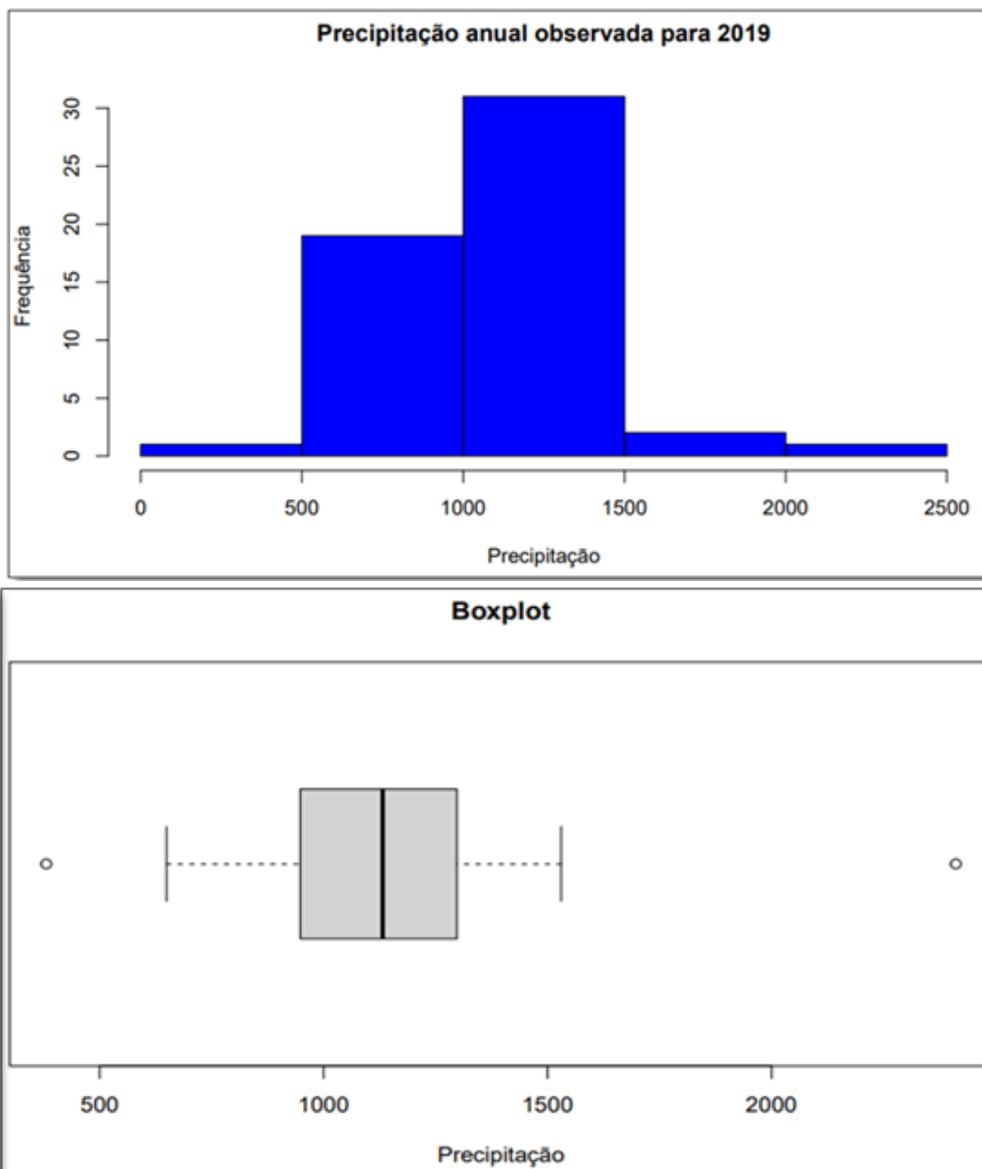


Figura 2: Histograma e boxplot para o conjunto de dados de precipitação.

Em seguida, envolveu a conversão dos dados brutos de precipitação em geodados, ou seja, vinculando cada valor de precipitação às coordenadas para transformá-los em dados espaciais. Após a transformação, obteve-se os valores referentes as distâncias mín. e máx. entre os pontos em estudo Tabela 2 e as coordenadas mínima e máxima dos vértices da região em estudo Tabela 3.



```
geodados<-as.geodata(dados,
                      coords.col=1:2,
                      data.col = 3)
geodados
summary(geodados)
```

Tabela 2: Valores das coordenadas máximas e mínimas da região em análise.

Coordenadas	Longitude	Latitude
Mínima	-51,82	-21,13
Máxima	-44,42	-14,09

Tabela 3: Distâncias mínima e máxima entre os pontos sob investigação.

Distâncias	Valores
Mínima	0,26
Máxima	8,57

Posteriormente, utilizou-se os comandos para importar uma planilha contendo o limite da área de estudo e caracterizou-se a distribuição espacial. Figura 3 é possível ver as tendências nos valores amostrais pelos gráficos de dispersões nas direções x e y com os comandos a seguir:

```
# Importação do polígono de estudo
limite = read_excel("Limite.xlsx")
plot(limite)
geodados$borders <- with(limite, cbind(x,y))

# Plotação dos dados
plot(geodados)
points(geodados,
       pt.div="quartile")
```

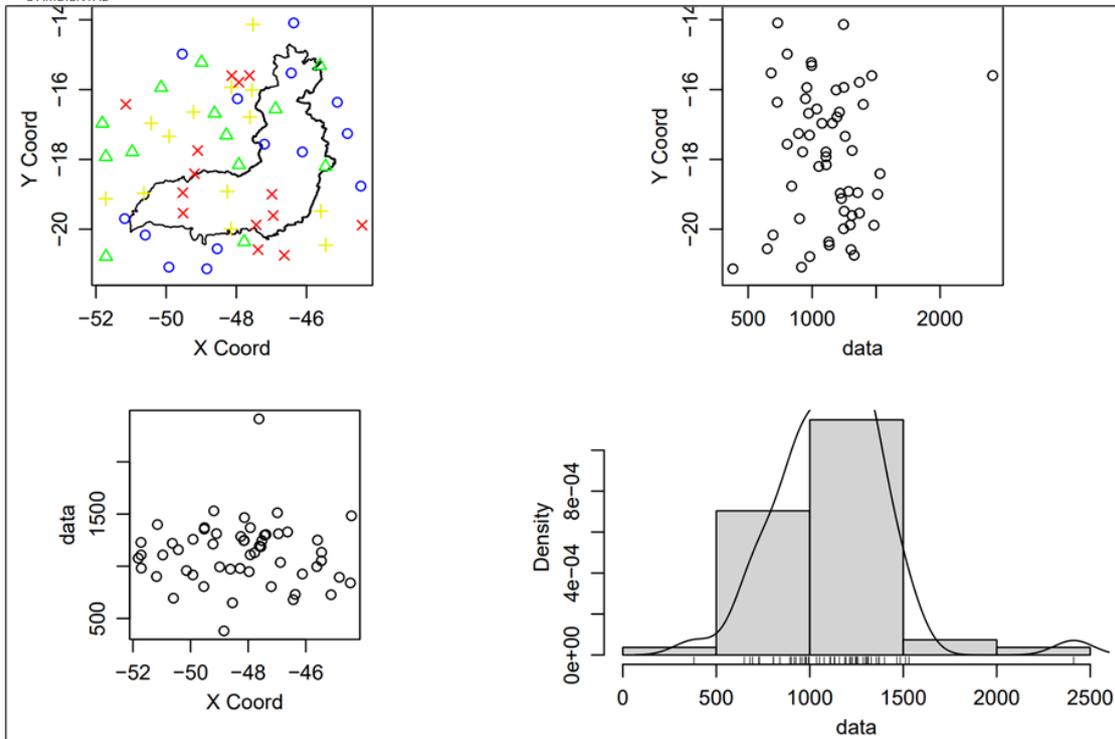


Figura 3: Gráficos de dispersões para análise da correlação.

Em seguida, calculou a semivariância, levando em consideração apenas 70% da distância máxima entre os pontos ajustou o seguinte variograma.

```
#Semivariância para os dados
semidados<-variog(geodados,
                 max.dist=6)
semidados

#Ajustando o modelo teórico de semivariograma
modelo<-eyefit(semidados)
modelo
```

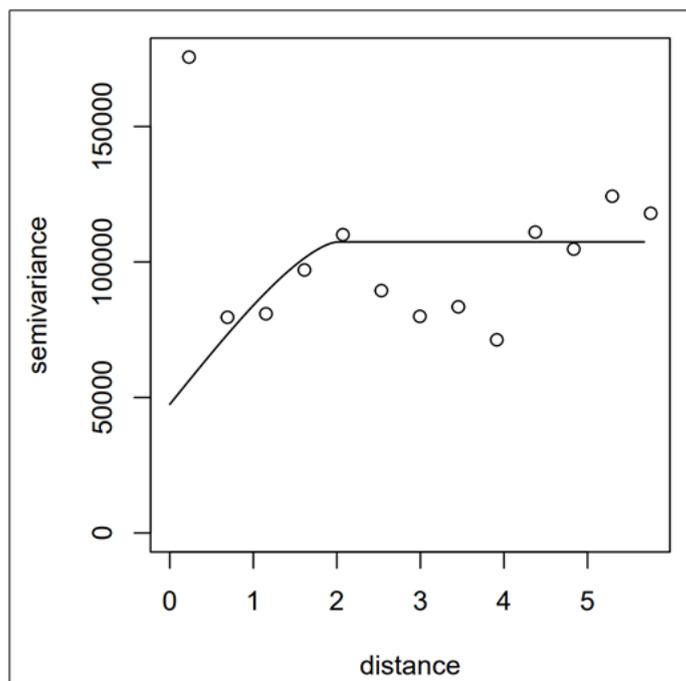


Figura 4: Semivariograma definido pelo método de ajuste a sentimento.

Por fim, concluiu-se o processo com a execução dos comandos destinados à obtenção das estimativas dos valores de precipitação por meio da técnica de Krigagem.

```
# Krigagem
kgeo <- krige.conv(geodados,
  loc=loci,
  borders=limite,
  krige=krige.control(type.krige = "ok",
    obj.modelo = modelo))

kgeo
summary(kgeo$predict)

contour(kgeo,
  filled=TRUE,
  levels=seq(836,1381, by=10))

title(main="Precipitação anual observada para 2019")
```

DISCUSSÃO

Ao observar o comportamento dos dados no gráfico boxplot e no histograma presentes na Figura 2, é possível perceber a presença de dois outliers nos dados e uma assimetria a esquerda. O primeiro outlier aponta valor abaixo do primeiro quartil demonstrando que a região apresentou um volume de precipitação muito baixo do que a média local, já o segundo outlier é possível perceber um volume atípico muito superior à média local caracterizando um volume de precipitação fora do esperado. O gráfico indica que os valores de sítio apresentam uma distribuição próxima da normal, o que significa que não há necessidade de transformação dos dados.



Na análise da disposição espacial da precipitação na Figura 3 os dados estão distribuídos sem uma tendência de concentração e as distribuições tanto no eixo x quanto no eixo y não possuem uma tendência amostral, é possível perceber que ao aumentar os valores tanto em x quanto em y a distribuição dos dados ainda apresenta um comportamento aleatório.

Para o ajuste do modelo teórico para representar o semivariograma Figura 4, utilizou o método a sentimento, obtendo os seguintes parâmetros apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros calculados no semivariograma.

Parâmetros	Valores
Máxima distância	6
Contribuição (C1)	59,94
Alcance teórico (a)	2
Efeito pepita (Co)	47,46
Modelo utilizado	circular

Para a obtenção do mapa com as previsões de precipitação por Krigagem, o primeiro passo envolveu a delimitação da área onde essas estimativas seriam geradas, tomando como referência os valores nos pontos de interesse da região em estudo. Dado que a distância entre os pontos com valores de precipitação apresenta uma irregularidade na distribuição e com localizações consideravelmente distantes entre si, deliberou-se escolher uma distância de previsão de 0,5 km, visando obter estimativas mais refinadas e detalhadas. O processo foi concluído com a representação visual desses valores previstos de precipitação em um mapa Fig. 5.

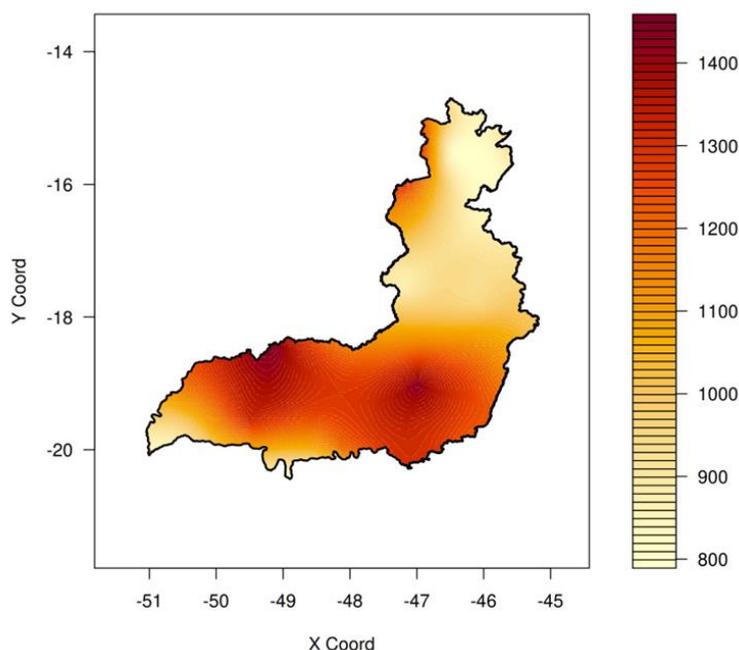


Figura 5: Valores estimados de precipitação para 2019 pela Krigagem.

Com o propósito de conduzir a validação cruzada do modelo teórico do semivariograma, aplicou-se os coeficientes de regressão como parâmetros fundamentais para essa avaliação Fig. 6.

```
# Validação cruzada do modelo escolhido para Krigagem
val<-xvalid(geodados,
            model=modelo)
plot(val)
R1<-lm(val$data~val$predicted)
```

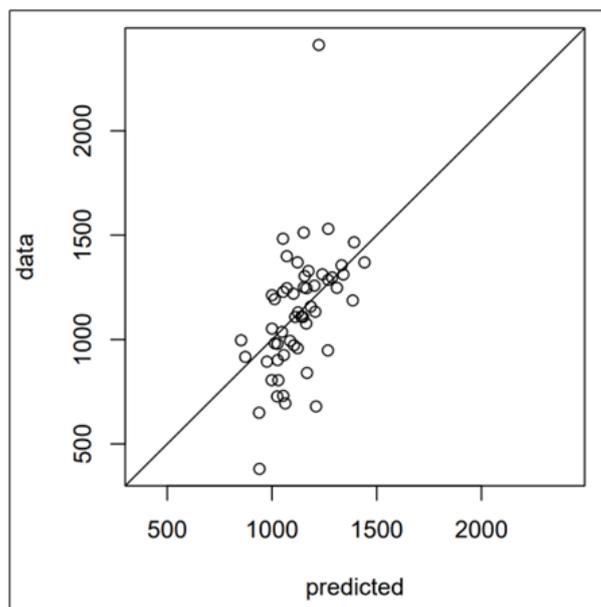


Figura 6: Resultado da regressão linear para a validação cruzada.

Observando o gráfico, podemos verificar a predição dos valores, e que essa relação é aproximadamente linear, percebeu-se que os pontos centrais estavam localizados, de forma aproximada, ao longo da reta indicando valores consideráveis de predição.

CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

Com base nos resultados apresentados anteriormente na validação cruzada, podemos concluir que o modelo circular no variograma demonstrou ser adequado para ajustar os dados de precipitação total em 2019 na região do 2º Comando Operacional dos Bombeiros de Minas Gerais. A irregularidade na distribuição espacial das distâncias entre os pontos com valores de precipitação possibilitou a aplicação da modelagem geoestatística por Krigagem. Esta abordagem revelou-se fundamental para compreender e representar os padrões espaciais, proporcionando uma análise mais refinada e detalhada dos valores de precipitação total.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. Princípios básicos em Geoprocessamento. In: ASSAD, E. D.; SANO, E. E. Sistema de informações geográficas: aplicações na agricultura. 2. ed. Brasília: Serviço de Produção de Informação/Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados/Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1998. p. 3-12.
2. CUNHA, Alexson de Mello et al. Espacialização da precipitação pluvial por meio de krigagem e cokrigagem. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 48, p. 1179-1191, 2013.
3. DALL'AGNOL, R. W.; BETZEK, N. M.; BAZZI, C. L. Aplicação do software R para análise geoestatística, interpolação de dados por krigagem ordinária e geração de mapas temáticos de produtividade agrícola. Revista de Computação aplicada ao Agronegócio, v. 1, n. 1, p. 24-37, 2018.
4. LANDIM, Paulo M. Barbosa; STURARO, José Ricardo. Krigagem indicativa aplicada à elaboração de mapas probabilísticos de riscos. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemática, Texto Didático, v. 6, n. 2002.19, 2002.
5. MELLO, CR de et al. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 27, p. 925-933, 2003.
6. MELLO, Y. R. de; OLIVEIRA, T. M. N. de. Análise estatística e geoestatística da precipitação média para o município de Joinville (SC). Revista Brasileira de Meteorologia, v. 31, p. 229-239, 2016.



SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO
DE ENGENHARIA SANITÁRIA
E AMBIENTAL



7. PELLICONE, G. et al. Application of several spatial interpolation techniques to monthly rainfall data in the Calabria region (southern Italy). *International Journal of Climatology*. v. 38, n. 9, 2018, p. 3651–3666.
8. SERVIDONI, L. E. et al. Avaliação de risco a enchentes e inundações por krigagem ordinária em sistemas de informação geográfica. *Caderno de Geografia*, v. 29, n. 1, p. 126-143, 2019.
9. YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo. Oficina Textos. 2013. 215p