

Uso dos Métodos de Krigagem e Spline de Tensão no Mapeamento de Chuvas na Região Metropolitana de Goiânia e Seu Entorno

Francisco F. N. Marcuzzo

SGB / CPRM – Ministério de Minas e Energia - Goiânia/GO

francisco.marcuzzo@cprm.gov.br

Murilo R. D. Cardoso

Universidade Federal de Goiás, Instituto de Estudos Sócio-Ambientais/GO

muriloshinobi@gmail.com

Luis Tomás Azevedo de Mello

SGB / CPRM – Ministério de Minas e Energia - Goiânia/GO

luistomas.mello@gmail.com

RESUMO - A exata determinação da distribuição espacial de precipitações pluviométricas é de relevante seriedade no planejamento dos recursos hídricos em regiões agrícolas e metropolitanas, servindo também como apoio a estudos climatológicos e meteorológicos. O presente trabalho teve o objetivo de analisar detalhadamente os métodos de interpolação matemática de Krigagem e Spline de Tensão que geram regionalização de pontos, segundo seus valores médios, por isolinhas, com o intuito de descobrir analiticamente o melhor método para espacialização dos valores pluviométricos. Foram utilizados dados consistidos de precipitação pluviométrica mensal de 21 estações pluviométricas distribuídas na região metropolitana de Goiânia e seu entorno. Os dados foram obtidos do Serviço Geológico do Brasil e da Agência Nacional de Águas, correspondendo à série histórica de 1974 a 2008. Depois de tratados e consistidos, eles foram submetidos a metodologias de interpolação matemática por Krigagem e Spline de Tensão com o intuito de verificar qual é a mais adequada a espacialização de pontos com valores de precipitação. Os resultados são apresentados em forma de mapas da distribuição espacial mensal e total das chuvas. Conclui-se que, para os dados de chuva da região metropolitana de Goiânia e seu entorno, os melhores resultados de distribuição espacial das chuvas foram obtidos através do método de interpolação por Krigagem.

Palavras-chave: Pluviometria, Espacialização de Chuvas, Precipitação Pluviométrica, Mapeamento de Precipitação.

Introdução

A espacialização de dados de precipitação pluviométrica é extremamente importante para diversas atividades, pois a variável chuva é um fator que implica diretamente em vários tipos de planejamento e estudos, sendo assim um elemento multidisciplinar que pode desde modificar completamente a paisagem geográfica como ser determinante para se definir épocas de plantio ou de início de obras. Contudo, há diversas formas de se espacializar dados de estações pluviométricas, uma delas é pela interpolação dos dados espaciais para fim de espacializá-los de maneira mais concisa em determinada área. Porém, existem diversos métodos de interpolação como IDW, Topo to Raster, Krigagem e Spline. Este presente estudo propõe-se a analisar os métodos de interpolação Spline de Tensão e Krigagem na espacialização de dados de precipitação pluviométrica.

O uso de interpoladores para se espacializar os dados de chuvas no Brasil se faz extremamente necessário pelo fato de se haver uma enorme escassez de estações pluviométricas no país, deficiência cada vez mais notável conforme se distancia do litoral e dos grandes centros populacionais.

Diversos estudos sobre interpolação de dados vêm sendo feitos no país acompanhando o crescimento de estudos climáticos nas diversas regiões. Segundo Barbosa (2006), o método de Krigagem se mostrou o mais eficaz para a espacialização dos dados das estações pluviométricas no estado de São Paulo, enquanto Tieppo et al. (2010), analisou o método IDW como o melhor para espacializar os dados no Mato Grosso. Essa discrepância quanto às metodologias de interpolação se dá exatamente pela densidade de estações que variam de região para região do território nacional e normalmente estão mal distribuídas.

Material e Métodos

Caracterização Geral da Área de Estudos

Para a comparação dos métodos de interpolação propostos neste estudo foi delimitada uma área composta pela RMG (Região Metropolitana de Goiânia) e mais todos os municípios de abrangem uma área de 60 quilômetros dos limites da área total da RMG (Figura 1). Essa delimitação da área de estudo se deu pelo fato de haver na região metropolitana apenas 4 estações, o que poderia comprometer o estudo. Com essa

nova delimitação o número de estações passou para 21 (Figura 2) proporcionando maior confiabilidade nos resultados. A região delimitada para esse estudo ocupa uma área de 43.645,5 km², em média 12,5% da área total do estado de Goiás, e abrange 71 municípios com uma população de 2.957.538 habitantes (IBGE, 2008), o que representa aproximadamente 50% da população total do estado e que significa uma densidade demográfica de 68 pessoas por km². O Cerrado é o bioma predominante dessa região, entretanto a atividade rural substituiu a maioria da cobertura vegetal nativa. Segundo PROBIO (2002), a agricultura representa 12%, a pastagem 77% e apenas 6,4% remanescentes do Cerrado (Savana). Esse resultado é refletido no INR (Índice Normalizado de Remanescentes)¹ que varia de -1 a -0,78 (o menor do estado de Goiás).

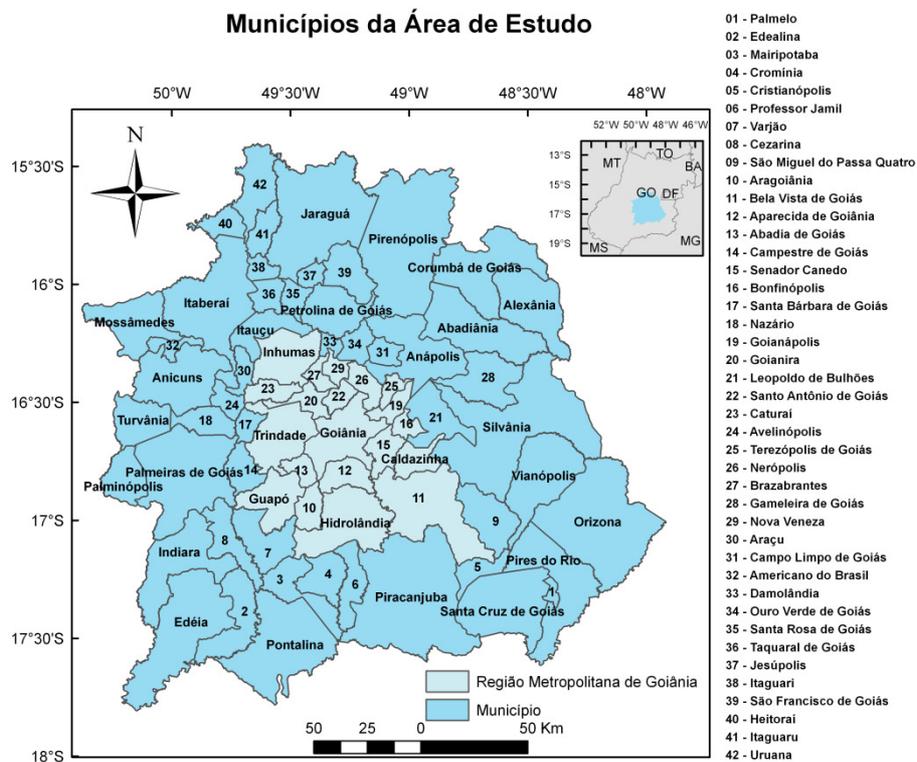


Figura 1. Municípios da área de estudo (Fonte dos dados para confecção do mapa: IBGE)

Dados utilizados no estudo

Foram utilizados dados de precipitação mensal de 21 estações pluviométricas distribuídas dentro da área da figura 1. Nota-se que a maioria das estações estão localizadas na região centro-oeste e que há grande defasagem no nordeste, leste e

¹ Esse índice varia de -1 a 1 e quanto mais próximo de 1 maior a presença de remanescentes, o que significa que a cobertura vegetal nativa é quase inexistente no local (Ferreira et al., 2008).

sudeste (Figura 2). Vale salientar que a região metropolitana de Goiânia conta apenas com 4 estações pluviométricas, o que é muito pouco para se ter confiabilidade na análise quando comparada a realidade, por isso faz-se necessário a utilização das estações vizinhas mais próximas da região metropolitana de Goiânia. Os dados correspondem ao período de 1974 a 2008 (três decêndios) e foram obtidos da Rede Hidrometeorológica Nacional da Agência Nacional de Águas (ANA).

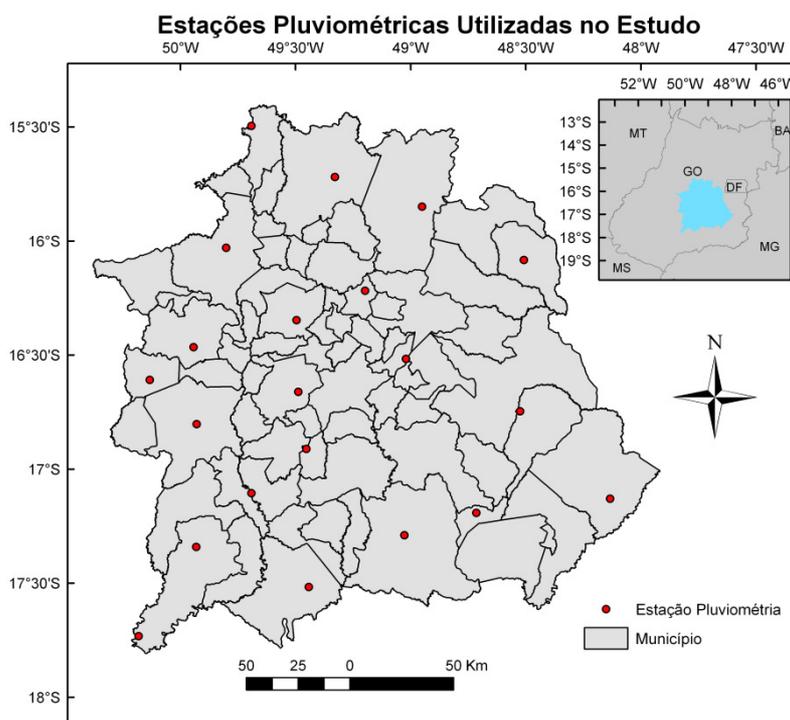


Figura 2. Estações pluviométrica utilizadas no estudo (Fonte dos dados para confecção do mapa: IBGE e ANA)

Método de interpolação matemática dos dados pluviométricos

Interpolação matemática pelo método da Krigagem

No método da Krigagem a variação espacial é quantificada por um semivariograma. O semivariograma é um gráfico de dispersão da semivariância versus distância dos pontos amostrados, sendo que a semivariância é uma medida de dispersão, a metade da variância. O semivariograma serve para analisar a dependência espacial entre as amostras.

O semivariograma é calculado a partir dos pontos amostrados usando a seguinte equação:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^s \{Z(x_i) - Z(x_i + h)\}^2 \quad (1)$$

em que, h - é uma distância; n é o numero de pontos amostrados separados pela distância h , $\gamma(h)$ - é a semivariância para a distância h , s - é a quantidade de pares de pontos separada pela distância h , $z(x)$ - é o valor da amostra na localidade x , e $z(x+h)$ é o valor da amostra na localidade separada da localidade x pela distância h . Computacionalmente utiliza-se para h uma faixa de distâncias para melhorar o desempenho.

Para se determinar os pesos dos pontos amostrados é necessário ajustar o semivariograma usando um modelo que depende do problema.

Abaixo está o modelo matemático que foi usado para ajustar a semivariância, sua forma e sua fórmula matemática.

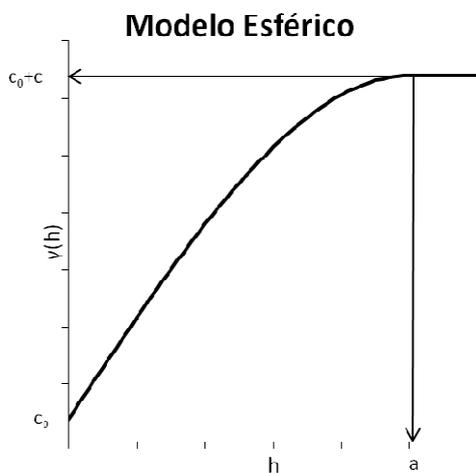


Figura 3. Modelo esférico de semivariograma.

$$\gamma(h) = \begin{cases} c_0 + c \left(\frac{3h}{2a} - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right), & \text{se } 0 < h \leq a \\ c_0 + c, & \text{se } h > a \end{cases} \quad (2)$$

$$\gamma(0) = c_0$$

em que, a - é a distancia a partir da qual não há mais correlação espacial entre as variáveis, e, portanto não há aumento no semivariograma; c_0 -, chamado de nugget, é o valor de γ para distâncias iguais a zero, que indica as variações para distâncias muito pequenas, devido a erros de medição ou a variações de pequena escala, e $c_0 + c$ - chamado de sill, é o valor médio da semivariância além da distância a , o valor de c também é chamado de partial sill.

Para o cálculo da interpolação do valor de um ponto através do método da krigagem, utiliza-se a seguinte equação matemática:

$$Z(x) = \frac{\sum_{i=1}^n \omega_i Z(x_i)}{\sum_{i=1}^n \omega_i} \quad (3)$$

em que, $Z(x)$ - é o valor do ponto que se deseja interpolar; n - é a quantidade de pontos amostrados cujos valores serão usados na interpolação do ponto x ; $Z(x_i)$ - é o valor do ponto amostrado; e ω_i é o valor do peso do valor de $Z(x_i)$ sobre o ponto x .

Para se determinar os pesos ω_i o método de krigagem utilizado, que foi a krigagem ordinária, deve resolver o seguinte sistema matemático:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^N \omega_i \gamma(h_{ij}) + \mu &= \gamma(h_j), \quad j = 1, \dots, n \\ \sum_{i=1}^N \omega_i &= 1 \end{aligned} \quad (4)$$

em que, ω_i - é o peso para cada ponto; μ - é uma variável temporária; $\gamma(h)$ - é o valor de semivariância para pontos separados por uma distância h ; h_{ij} - é a distância entre os pontos x_i e x_j ; h_j - é a distância entre o ponto que se deseja calcular o valor x e o ponto x_j . Na krigagem ordinária a soma dos pesos é igual a um, e, portanto a equação 5 se resume à:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i Z(x_i) \quad (5)$$

Interpolação matemática pelo método do Spline de Tensão

O método do Spline é um método de interpolação que estima valores usando uma função matemática que minimiza a curvatura da superfície resultando em uma superfície suave que passa exatamente pelos pontos de entrada.

Em geral, uma função Spline $S(x)$ deve preencher a condição de que $S(x)$ para os pontos medidos deve ser igual a $z(x)$ e ao mesmo tempo a seminorma de suavização $I(S)$ deve ser o menor possível.

$$S(x_j) = z(x_j) \quad \text{e} \quad (6)$$

$$I(S) = \min \quad (7)$$

em que, $z(x_j)$ - são os valores das variáveis nos pontos x_j amostrados; e $I(S)$ - é uma função que mede a suavização de S chamada de seminorma de suavização. Um ponto x é definido pelos valores (x_1, x_2) sendo x_1 a localização na coordenada x cartesiana e x_2 a coordenada y cartesiana. A seminorma de suavização $I(S)$ é calculada através da equação (Hofierka et al., 2002):

$$I^2(S) = \sum_{\alpha} B_{\alpha} \iint_{\Omega} \left[\frac{\partial^{|\alpha|}}{\partial x_1^{\alpha_1} \partial x_2^{\alpha_2}} S(x) \right]^2 dx_1 dx_2 \quad (8)$$

em que, $\alpha=(\alpha_1,\alpha_2)$, com α_1 variando de 0 ao grau de x_1 em $S(x)$, α_2 variando de 0 ao grau de x_2 em $S(x)$, sendo $|\alpha|= \alpha_1+ \alpha_2$, e Ω é a região considerada do espaço bidimensional.

B_{α} é uma constante não negativa definida pela equação:

$$B_{\alpha} = \begin{cases} 0, & \text{se } |\alpha| = 0 \\ \frac{|\alpha|!}{\alpha_1! \alpha_2! \varphi^{2|\alpha|} (|\alpha| - 1)!}, & \text{se } |\alpha| > 0 \end{cases} \quad (9)$$

em que, φ - é o peso de termos particulares na soma (peso de tensão), quanto maior φ , maior a influência de derivadas de ordem superior sobre a função resultante.

A solução geral de $S(x)$ é dada por:

$$S(x) = T(x) + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(x, x_j) \quad (10)$$

em que, $T(x)$ - é uma função de ‘tendência’; e $R(x,x_j)$ - é uma função da base radial cuja forma explícita é:

$$R(x, x_j) = -[E_1(\rho) + \ln(\rho) + C_E] \\ \rho = \left(\frac{\varphi r(x, x_j)}{2} \right)^2 \quad (11)$$

em que, E_1 - é a função exponencial integral; C_E - é a constante de Euler; e r - é a distancia entre p e p_j definida por:

$$r(x, x_j) = \sqrt{(x_1 - x_{j1})^2 + (x_2 - x_{j2})^2} \quad (12)$$

No caso do Spline de Tensão, $T(x)=a_1$. As constantes a_1 e λ_j são determinadas se resolvendo o seguinte sistema de equações:

$$a_1 + \sum_{j=1}^N \lambda_j R(x_i, x_j) = z_i, i = 1, \dots, N \\ \sum_{j=1}^N \lambda_j = 0 \quad (13)$$

em que, x_i e x_j - são os pontos amostrados; e z_i - é o valor de z no local de x_i .

Resultados e Discussão

Usando como referência as 21 estações pluviométricas distribuídas pela área de estudo foram gerados 26 mapas de precipitação para a região, 12 mensais (1 para cada mês do ano) e 1 anual para cada método de interpolação, Krigagem e Spline de Tensão.

Na comparação dos métodos de interpolação da distribuição espacial da chuva utilizando a média anual da precipitação pluviométrica de um período de 35 anos (1974 à 2008), podemos observar uma discrepância muito nítida entre os dois métodos. Apesar de os valores terem se distribuído, grosso modo, de forma similar em algumas regiões, como no extremo sul e na fronteira entre Silvânia e Vianópolis, por exemplo, a disposição com que se espacializaram se diverge. Na própria região do extremo sul, mais precisamente nos arredores de Piracanjuba, os valores de precipitação 1900 à 2000 mm e 2000 à 2100 mm, se dispuseram de maneira mais abrangente ocupando um espaço maior com o método Spline de Tensão naquela região (Figura 4). Outro exemplo da diferença da espacialização que exercem cada método de interpolação é o da região norte onde no método Spline de tensão, além da forma mais abrangente em que se espalhou os valores de 1600 à 1700 mm, ainda houve a criação de uma zona a mais que não apareceu no método de Krigagem, de 1700 à 1800 mm.

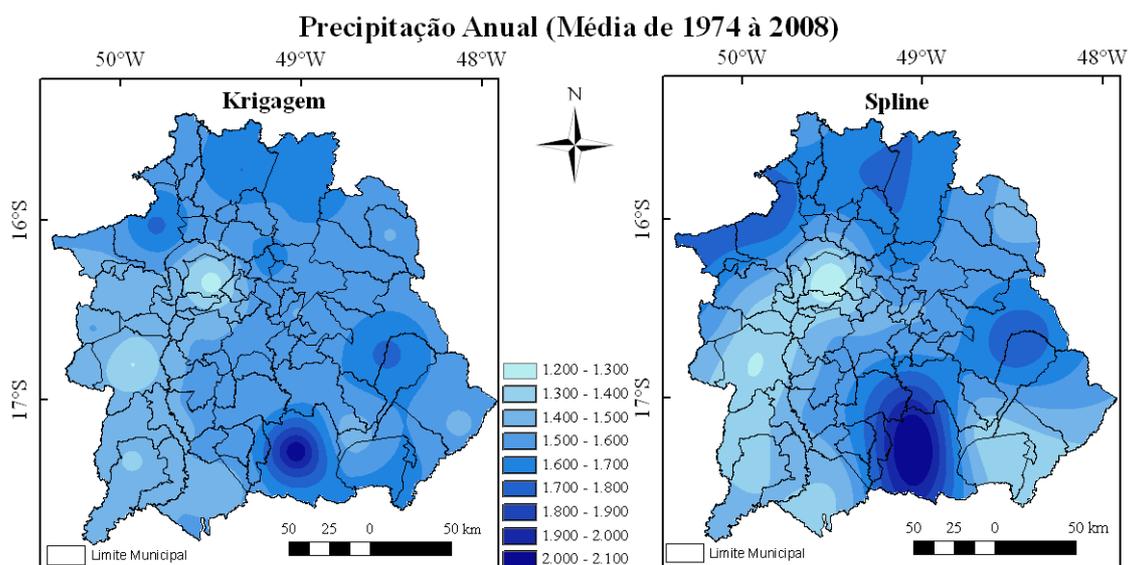


Figura 4. Precipitação anual (média de 1974 à 2008) interpolada pelos métodos de Krigagem e Spline de tensão.

O método da Krigagem (equações de 1 à 5) é um processo geoestatístico que gera interpolações que não passam exatamente pelos pontos da amostra, mas faz uma aproximação usando métodos estatísticos que podem gerar uma interpolação de melhor qualidade se os dados forem mais concentrados e com uma variação grande. O método do Spline de Tensão (equações de 6 à 13) gera interpolações que denotam uma superfície suave que passa exatamente pelos pontos da amostra, e isso faz com que possa haver muitas isolinhas indesejadas.

Nas Figuras 4, 5, 6, 7 e 8 nota-se que o método Spline de Tensão gera mais isolinhas, apesar de elas passarem exatamente pelos pontos amostrados, e a Krigagem, apesar de não passar exatamente pelos pontos amostrados gera um mapa com menos isolinhas.

Como é possível observar na Figura 5 correspondente ao primeiro trimestre, houve grande diferença na distribuição das faixas para os dois métodos analisados. Em janeiro a faixa de 400 a 425 mm ocuparam a mesma região central para ambos os métodos. Contudo, no Spline de Tensão foi inserida a faixa de 425 a 450 mm entre a faixa de 400 a 425 mm, enquanto os valores entre 425 e 450 mm ocuparam apenas uma região pequena no noroeste. No mês de fevereiro, a maior diferença pode ser observada na região sul onde o Spline de Tensão criou três faixas com diferentes valores de precipitação (225 à 250, 250 à 275 e 275 à 300 mm) enquanto no método de Krigagem apenas duas faixas foram criadas (250 à 275 e 275 à 300 mm). No mês de março novamente houve semelhança na faixa que cobre a região central de leste a oeste. Entretanto, no norte a interpolação pelo método Spline de Tensão criou cinco faixas com diferentes valores de precipitação pluviométrica enquanto na Krigagem foram criadas três faixas e mais uma pequena região circular dentro do município de Pirenópolis, totalizando quatro zonas diferentes de precipitação pluviométrica. No sul a situação foi semelhante a do norte durante o mês de março, onde o Spline de Tensão criou cinco faixas regiões diferentes e a Krigagem quatro, com destaque para a discrepância na faixa correspondente aos valores de 220 a 230 mm onde para a Krigagem ficou concentrada no extremo sul e em uma pequena parte do sudoeste e no Spline de Tensão essa faixa cobriu quase toda a região sul.

Nos meses correspondentes ao segundo trimestre, representados pela Figura 6, novamente houve semelhança para a faixa que cobre a região central de leste a oeste nos meses de abril e maio, contudo esse mesmo padrão, que ocorreu para os cinco primeiros meses não se repetiu para o mês de julho. Houve também discrepância, repetindo o primeiro trimestre nas regiões sul e norte da área de estudo. No mês de abril o método do Spline de Tensão criou quatro faixas na região norte, enquanto a Krigagem criou três, com diferença maior para a espacialização da faixa 90 à 100 mm, onde no Spline de Tensão criou-se uma faixa retilínea e a Krigagem uma região em forma de círculo. No sul, o Spline de Tensão criou três faixas e a Krigagem duas. Houve semelhança na faixa 110 à 120 mm, contudo na Krigagem essa faixa, além de se espacializar de leste a oeste da região centro – sul, criou um corredor até o município de Santa Cruz de Goiás.

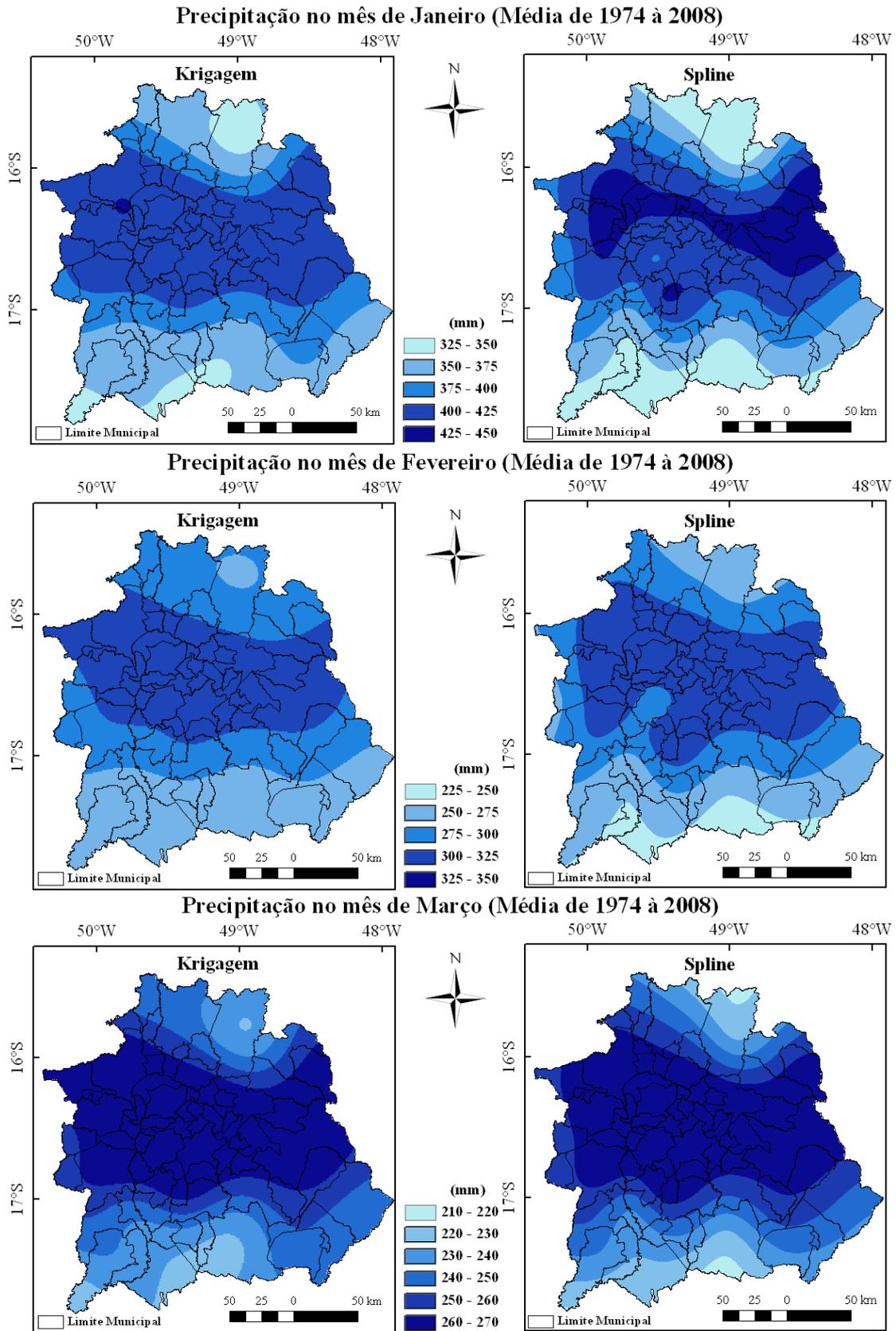


Figura 5. Precipitação no primeiro trimestre (média de 1974 a 2008) interpolada pelos métodos de Krigagem e Spline de tensão.

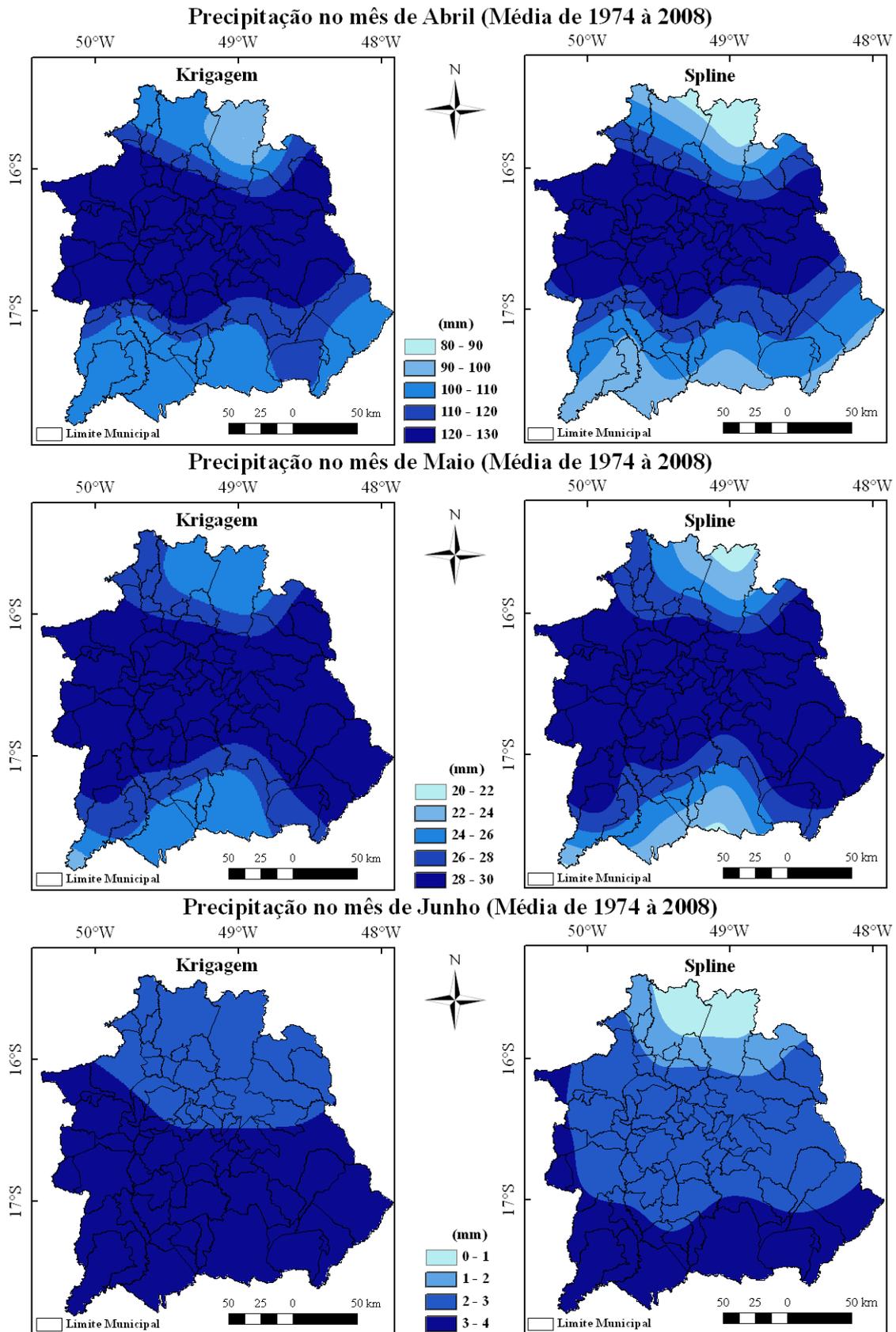


Figura 6. Precipitação no segundo trimestre (média de 1974 à 2008) interpolada pelos métodos de Krigagem e Spline de tensão.

Para o mês de maio (Figura 6) houve ainda maior discrepância no norte, onde o Spline de Tensão criou quatro faixas e a Krigagem criou duas. Na região onde a Krigagem criou apenas a faixa 24 à 26 mm no Spline de tensão ela foi dividida ainda em mais dois intervalos, além do 24 à 26 mm, foi criada a faixa 22 à 24 mm e 20 à 22 mm. No mês de junho, o método de Krigagem criou apenas duas regiões nos intervalos 2 à 3 e 3 à 4 mm, enquanto o Spline criou na região norte da área de estudo mais duas zonas, de 0 – 1 e 1 à 2 mm.

No terceiro trimestre o primeiro mês, julho, houve uma espacialização dos dados semelhantes para os dois métodos (Figura 7). Diferente do mês anterior, junho, em que o Spline de Tensão criou duas regiões a mais do que o método de Krigagem, em julho além de terem sido criadas as mesmas zonas para os dois métodos elas ainda se espacializaram de maneira muito similar, apesar de as faixas criadas pelo método de Krigagem terem sido mais lineares enquanto no método Spline de Tensão elas estão dispostas de maneira ondulada. Em contra partida, o mês seguinte a julho, agosto, a disposição da espacialização foi extremamente discrepante. Os valores foram os mesmos para os dois métodos de interpolação, contudo enquanto na Krigagem eles dispuseram novamente de forma linear e gradativamente crescente, em termos de valores de precipitação (mm), do sul para o norte, no Spline de Tensão os valores se espacializaram de maneira muito mais desordenada em comparação com o outro método. Isso fica melhor ilustrado quando se nota a noroeste a zona em forma circular apresentando os valores 9 à 10 mm e 10 à 11 mm criada pelo Spline. No mês de setembro novamente os valores apresentados foram os mesmos. Contudo, a grande faixa central de leste a oeste da área de estudo se apresentou maior enquanto as outras faixas se dispuseram de em linhas mais tênues no método Spline de Tensão em relação à forma em que se dispuseram as mesmas faixas no método de Krigagem.

Na análise do último trimestre do ano (Figura 8), os dados se espacializaram de maneira muito similar para todos os três meses. Contudo, no mês de outubro o método Spline de Tensão criou uma zona a mais do que a Krigagem, a zona 120 à 130 mm localizada na região norte da área de estudo. No mês de novembro, em geral, a disposição da espacialização foi muito parecida, com pequenas diferenças como na zona 220 à 230 mm que se apresentou de forma mais abrangente no sul da área de estudo com o método Spline de Tensão. O mês de dezembro houve grande diferença da espacialização dos dados na região norte onde o método Spline de Tensão criou cinco zonas enquanto a Krigagem criou quatro.

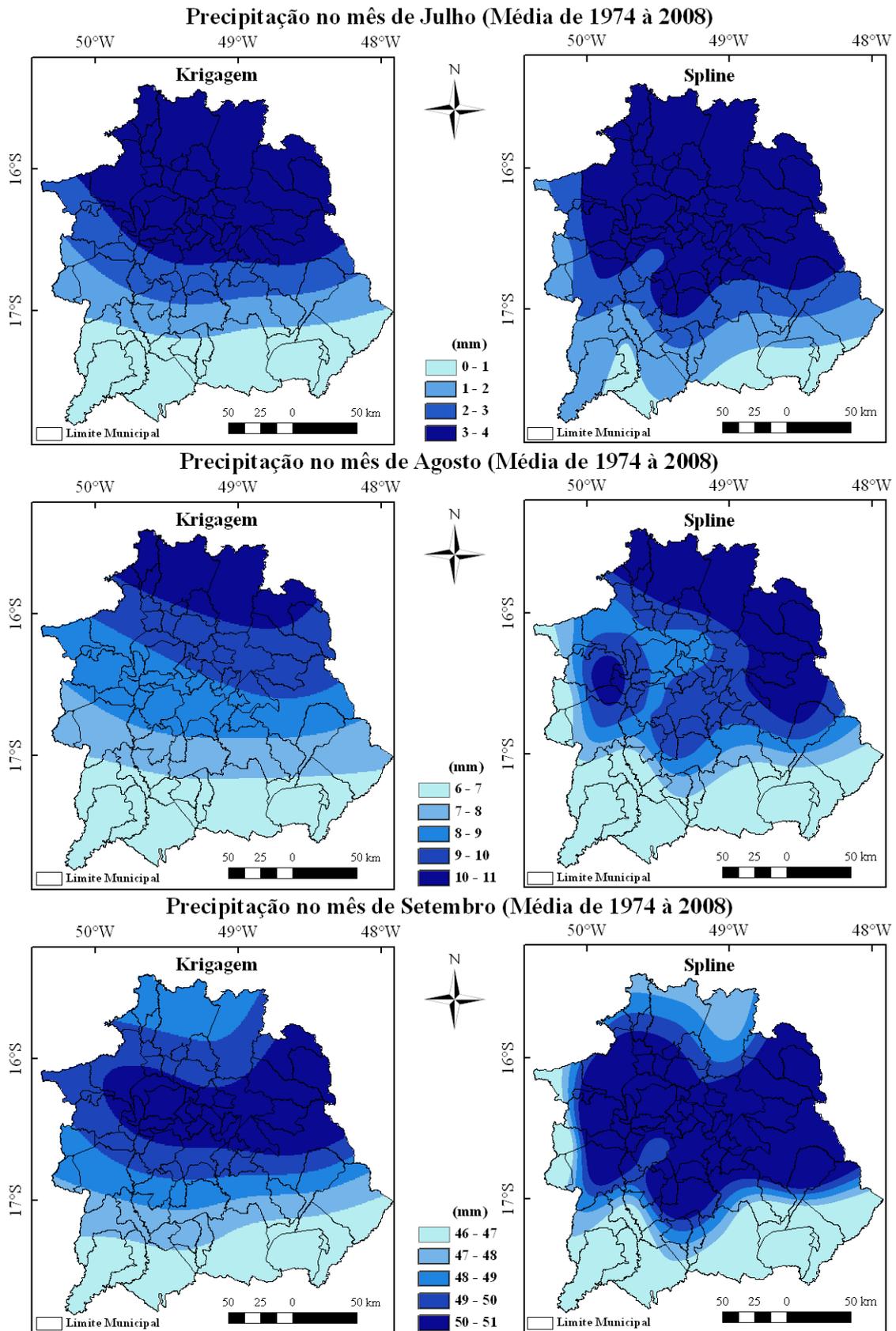


Figura 7. Precipitação no terceiro trimestre (média de 1974 à 2008) interpolada pelos métodos de Krigagem e Spline de tensão.

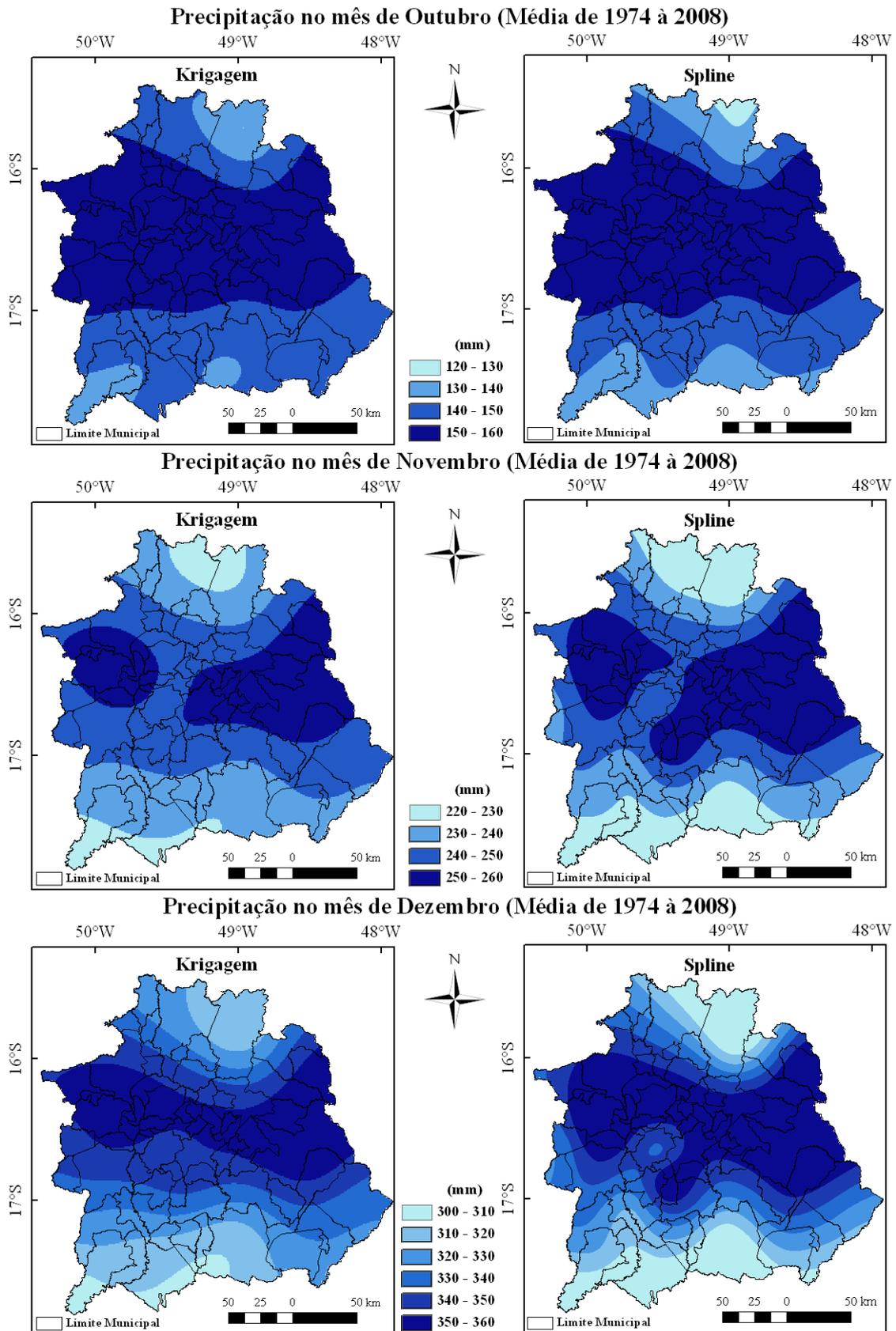


Figura 8. Precipitação no quarto trimestre (média de 1974 à 2008) interpolada pelos métodos de Krigagem e Spline de tensão.

Conclusões

No geral, os dois métodos de interpolação se mostraram bastantes discrepantes em termos de espacialização dos dados. No caso aqui estudado, a metodologia de interpolação matemática por Spline de Tensão produziu, na grande maioria dos casos, um número maior de isolinhas que a metodologia de interpolação matemática por Krigagem. Esse maior número de isolinhas acabou por dificultar a interpretação e ainda gerou inconsistências em alguns mapas. O método de Krigagem, por sua vez, apresentou melhores resultados, pois o nível de detalhamento, ou isolinhas, apesar de ter sido menor manteve a qualidade da espacialização, facilitando a visualização das zonas de precipitação.

Referências

BARBOSA, J. P. M., **Utilização de método de interpolação para análise e espacialização de dados climáticos: o SIG como ferramenta.** Caminhos de Geografia v. 9 (17) p. 85 – 96. 2006.

FERREIRA, M. E.; FERREIRA Jr., L. G.; FERREIRA, N. C.. **Cobertura vegetal remanescente em Goiás: Distribuição, viabilidade ecológica e monitoramento.** In: A encruzilhada socioambiental: biodiversidade, economia e sustentabilidade no cerrado. Org. Laerte Guimarães Ferreira Jr. Ed. UFG. Goiânia-GO. p.169-185. 2008.

PROBIO (Projeto de Conservação e Utilização Sustentável da Diversidade Biológica Brasileira) do Ministério do Meio Ambiente. **Mapeamento de cobertura vegetal do bioma Cerrado.** Relatório final. 2002.

HOFIERKA, J.; PARAJKA, J.; MITASOVA, H.; MITAS, L. (20). **Multivariate Interpolation of Precipitation Using Regularized Spline with Tension.** Transactions in GIS. p. 135-150. 2002.

TIEPPO, R. C.; NUNES, C. C. P.; DALLACORT, R.; FIETZ, C. R.; COMUNELLO, E.; CREMON, C.. **Análise de interpoladores na geração de mapas de precipitação para o Estado de Mato Grosso.** Anais 3º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, Cáceres, MT, 16-20 de outubro 2010 Embrapa Informática Agropecuária/INPE, p. 95 -105, 2010