

ANÁLISE COMPARATIVA DA ESPACIALIZAÇÃO DO RISCO CLIMÁTICO PELA MÉDIA PONDERADA, KRIGEAGEM ORDINÁRIA E KRIGEAGEM POR INDICAÇÃO

MARIZA ALVES DE MACEDO ¹

JULIO CESAR DE OLIVEIRA ²

ALDA MONTEIRO BARBOSA ³

GILBERTO CÂMARA ⁴

EDUARDO DELGADO ASSAD ⁵

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto

Caixa Postal 515 - CEP 12201-097 - São José dos Campos - SP, Brasil.

¹ mariza@ltid.inpe.br; ² oliveira@ltid.inpe.br; ³ alda@ltid.inpe.br;

⁴ **Divisão de Processamento de Imagens**

gilberto@dpi.inpe.br

⁵ **EMBRAPA - Cerrados**

Br 020 - Km 18 - CEP - 7330-970 - Planaltina - DF, Brasil.

assad@cpac.embrapa.br

Abstract This paper applied geostatistic methodologies as an alternative to the deterministic interpolation for accomplishing the espacialization of ISNA data.

Keywords: interpolation, geoestatistic, deterministic, ISNA.

1. INTRODUÇÃO

A produtividade das diferentes culturas agrícolas é altamente dependente da oferta pluviométrica bem como da frequência e intensidade dos períodos secos durante a estação chuvosa denominados veranicos.

A otimização das datas de plantio, pode ser realizada a partir da simulação dos termos de um balanço hídrico, cujos resultados quando georreferenciados, podem ser espacializados por meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) (Assad et al., 1998).

Diferentes métodos estão disponíveis em SIGs de mercado, quando o objetivo é mapear a variabilidade espacial de um atributo. Entretanto, nem todos os modelos inferenciais propostos, respondem a questões básicas relacionadas á forma, tamanho e orientação do domínio a ser considerado na interpolação e tão pouco fornecem informações a respeito da incerteza associada aos valores estimados (Burrough, 1998).

2. OBJETIVO

Diante das questões que se interpõe quando se pretende estimar valores de atributos, em locais não amostrados, a partir de informações pontuais em localizações conhecidas, o objetivo deste trabalho foi aplicar métodos geoestatísticos (krigeagem ordinária e krigeagem por indicação), como alternativa ao interpolador média ponderada, utilizado pela Embrapa Cerrados, na espacialização das datas de plantio, atendendo aos objetivos do Programa Zoneamento Agrícola, coordenado pelo Ministério da Agricultura, com vista a comparar os diferentes métodos e identificar o mais adequado para este fim.

3. - ÍNDICE DE SATISFAÇÃO DAS NECESSIDADES DE ÁGUA

Entre os parâmetros obtidos a partir da simulação do balanço hídrico, destaca-se o índice dado pela relação entre a evapotranspiração real e a evapotranspiração máxima (ETR/ETM), ou seja, a quantidade de água que a planta consumiu e a que seria desejável para garantir plenamente a sua máxima produtividade conhecido como Índice de Satisfação das Necessidades de Água (ISNA) ou índice de penalização (Assad et al., 1988).

Para a simulação do balanço hídrico são computados: a precipitação pluviométrica diária, com um mínimo de 15 anos de dados; capacidade de armazenamento de água do solo; coeficiente de cultura (Kc), evapotranspiração potencial, duração do ciclo e duração das fases fenológicas da cultura.

O ciclo da planta, é dividido em quatro fases fenológicas: germinação-emergência, vegetativa; floração-enchimento de grãos e maturação .

O período de enchimento de grãos, é considerado o período crítico para as culturas, em termos de dependência de água. São então calculados os ISNAS médios dessa fase, para cada ano da série histórica e, em seguida, é realizada uma análise freqüencial para 20, 50 e 80% de ocorrência. Somente a frequência de 20% é espacializada pois sendo a mais conservadora, indica se o índice é maior ou igual a um certo valor para oito em cada 10 anos, isto é, em 80% dos anos (Assad et al., 1988).

4.0 - MÉTODOS DE INTERPOLAÇÃO

4.1. MÉDIA MÓVEL PONDERADA

O interpolador média ponderada calcula o valor de cota (**z**), de cada ponto da grade, a partir da média ponderada das cotas dos 8 vizinhos mais próximos, porém atribui pesos variados para cada ponto amostrado através de uma função $w(x,y)$ que considera a distância do ponto cotado ao ponto da grade.

$$f(x, y) = \frac{\left(\sum_1^8 w(x, y) \right) z}{\left(\sum_1^8 w(x, y) \right)} \quad (1)$$

Um estimador determinístico por média móvel pode considerar a anisotropia do atributo a partir da definição do raio de busca dos vizinhos, que variam com a distância e com a direção. Entretanto na determinação dos pesos das amostras vizinhas por krigagem, há um formalismo mais rigoroso tendo em vista que tem sua base no modelo de correlação espacial denominado variografia (Felgueiras, 2000).

4.2. KRIGEAGEM ORDINÁRIA

A krigagem é um procedimento de inferência espacial estocástico que apresenta uma etapa de análise variográfica anterior aos procedimentos inferenciais onde a estrutura de covariância espacial é modelada (Fuks, 1998).

De acordo com Felgueiras (2000), um estimador de krigagem ordinária, utiliza médias locais ou tendências locais estimadas a partir das amostras vizinhas, ao invés de uma única média estacionária, como o faz um algoritmo de krigagem simples. Os valores (z) são estimados em localizações espaciais não observadas (\mathbf{u}), sem a necessidade de se conhecer a média estacionária m segundo uma combinação linear dos valores de um subconjunto amostral local. A condição para isso é a somatória dos ponderadores da krigagem ordinária $\lambda_{0\alpha}(\mathbf{u})$ seja igual a 1. O estimador de krigagem ordinária é dado por:

$$z_0^*(\mathbf{u}) = \sum_{a=1}^{n(\mathbf{u})} \mathbf{I}_{0a}(\mathbf{u}) \cdot z(\mathbf{u}_a) \quad (2)$$

A variância do erro de estimação, conhecida como variância de krigagem também pode ser traçada para informar sobre a confiança dos valores interpolados sobre a área de interesse (Burrough, 1998). Entretanto baseia-se apenas na localização geométrica do atributo não considerando a variabilidade do atributo. Isso implica em que o resultado fornecido é apenas uma comparação entre diferentes configurações geométricas, conforme já observado por Deutsch e Journel (1998), citados por Felgueiras (2000).

4.3. KRIGEAGEM POR INDICAÇÃO

Krigagem por indicação pode ser definida como uma técnica de inferência estatística, que permite a estimativa dos valores e das incertezas associadas ao atributo durante o processo de espacialização de uma propriedade amostrada. A propriedade em estudo é considerada uma variável aleatória em cada posição \mathbf{u} não amostrada, e as inferências dos valores $z(\mathbf{u})$ e das incertezas são obtidos a partir da construção da função de distribuição acumulada, $(F^*(\mathbf{u}; z_k | (n)))$ condicionada aos n dados amostrados, de cada variável aleatória (Felgueiras et al., 1999).

Trata-se de uma técnica de inferência estatística não linear, pois é aplicada sobre os valores do atributo transformados por um mapeamento não linear, a codificação por indicação. São então definidos valores de corte, z_k , $k=1,2,...,K$, em função do número de amostras. O estimador de krigagem de indicação é dado pela expressão abaixo, considerando-se a somatória dos pesos de ponderação $\lambda_{0\alpha}(\mathbf{u}; z_k)$ igual a 1,

$$F_0^*(\mathbf{u}; z_k | (n)) = \sum_{a=1}^{n(\mathbf{u})} \mathbf{I}_{0a}(\mathbf{u}; z_k) i(\mathbf{u}; z_k) \quad (3)$$

De acordo com Felgueiras (2000), a krigagem por indicação é tida como não-paramétrica, por não considerar nenhum tipo de distribuição de probabilidade a priori para a variável aleatória. Ao invés disso, ela possibilita a construção de uma aproximação discretizada da função de distribuição acumulada da variável aleatória. Os valores de probabilidade discretizados podem ser usados diretamente para se estimar valores estatísticos característicos da distribuição, tais como: média, variância, mediana, quantis, etc.

5. METODOLOGIA

Os dados utilizados, de domínio público, referem-se ao ISNA da terceira fase fenológica (período de enchimento de grãos) da cultura do milho ciclo médio, obtido por meio do balanço hídrico, para o dia 25 de novembro. Esses dados georreferenciados correspondem, geograficamente, à localização das 252 estações pluviométricas do Estado do Rio Grande do Sul.

Foram consideradas 3 classes de ISNAS para a cultura do milho ciclo médio:

- ISNA maior ou igual a 0,55 → o plantio é favorável naquela data;
- ISNA maior que 0,45 e menor que 0,55 → risco médio para o plantio naquela data;
- ISNA menor que 0,45 → alto risco de perdas agrícolas para aquela data, sendo portanto considerada desfavorável.

Para realização dos procedimentos de interpolação a que os dados foram submetidos, utilizou-se o Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas SPRING - INPE.

5.1 MÉDIA PONDERADA

Os dados foram primeiramente submetidos ao procedimento de interpolação pela média ponderada, o que é realizado de forma direta e automática nos diversos SIGs, bastando selecionar o interpolador desejado entre os disponíveis.

5.2 - KRIGEAGEM ORDINÁRIA

A partir de uma análise exploratória dos dados, etapa importante dentro de qualquer estudo geoestatístico, realizada com base na observação do histograma e gráfico abaixo (**figura 5.1 a e b**), foi suposta a hipótese de normalidade dos dados:

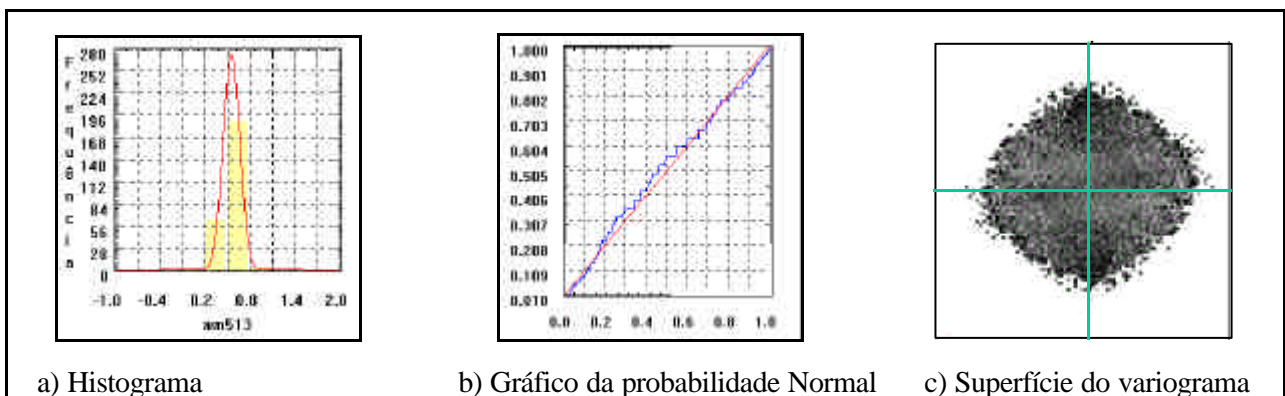


Figura 5.1 - Elementos gráficos para Análise Exploratória e de Superfície.

A análise de superfície (**figura 5.1 c**), necessária para verificação da continuidade espacial do atributo, mostrou que os dados em questão possuem distribuição espacial isotrópica, desta maneira um único modelo foi suficiente para descrever a sua variabilidade espacial.

A modelagem do semivariograma, etapa na qual foi modelada a interpretação da estrutura de correlação espacial utilizada nos procedimentos inferenciais da krigagem, envolveu o levantamento do semivariograma experimental; ajuste a uma família de modelos de semivariogramas; e a validação do modelo a ser utilizado nos procedimentos da krigagem.

O ajuste de um semivariograma é um processo iterativo no qual buscou-se adequar o variograma experimental a um modelo teórico. Foram introduzidos valores para os parâmetros: incremento (distância máxima entre duas amostras em que ainda haja correlação entre elas), lag, (distância pré-definida utilizada no cálculo do semivariograma), e tolerância (deve corresponder aproximadamente à metade do valor do incremento para que não haja sobreposição considerável da área de influência).

Deste modo foi obtido o variograma experimental figura, o qual é formado por uma série de valores sobre os quais deseja-se ajustar uma função.

Uma vez obtido o semivariograma experimental, procurou-se realizar o seu ajuste aos modelos teóricos (**figura 5.2**). O passo seguinte, validação do variograma, consistiu na re-estimação dos valores conhecidos de cada ponto amostrado da área. Este procedimento permite identificar possíveis erros de estimativa.

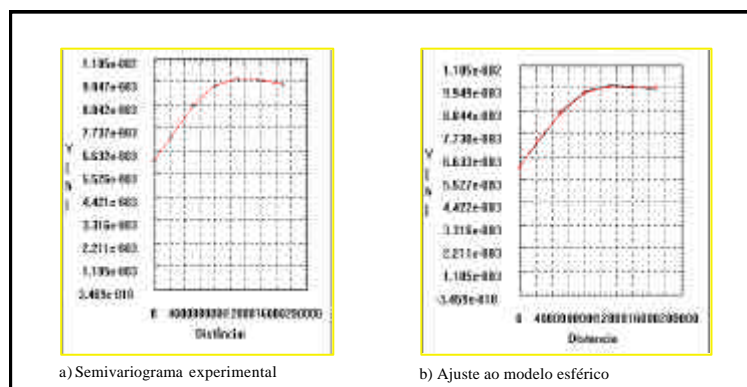


Figura 5.2 – Semivariograma experimental e seu ajuste a um modelo teórico.

O bom ajuste pode ser verificado pelo diagrama onde encontram-se plotados os valores observados e inferidos, pelo histograma do erro, e diagrama espacial do erro (**figuras 5.3 a, b e c**).

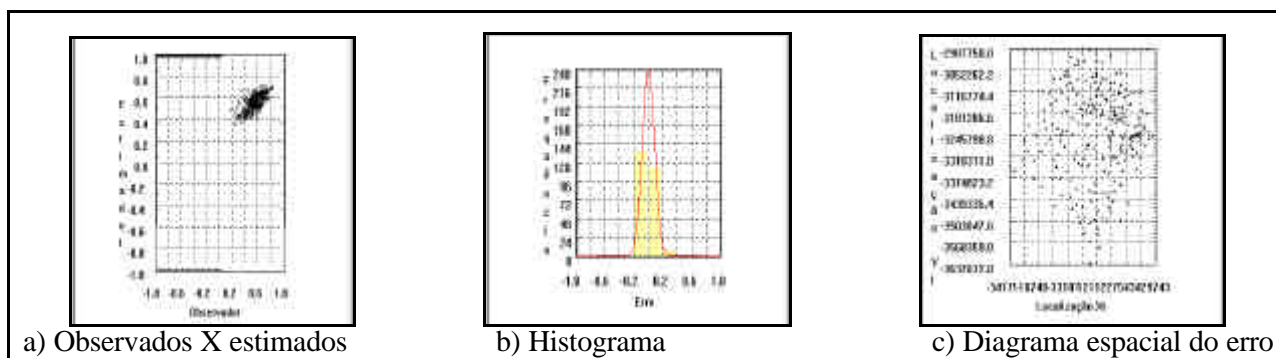


Figura 5.3 - Resultado da re-estimação dos pontos amostrais para a krigeagem ordinária.

Em seguida foi realizado o procedimento de krigeagem para espacialização do ISNA, a partir dos parâmetros obtidos nas etapas acima descritas.

5.3 - KRIGEAGEM POR INDICAÇÃO

Para execução da krigeagem por indicação, os valores do atributo foram organizados em ordem crescente e em seguida divididos em decis, definindo-se 9 valores de corte abaixo dos quais os valores das amostras são transformados em 1 e acima destes em 0, gerando assim um conjunto amostral por indicação.

Para os dados analisados, cujo valores variam entre 0.18 a 0.83, foram definidos os seguintes valores de corte: 0.395, 0.465, 0.505, 0.535, 0.565, 0.585, 0.605, 0.645, 0.685. Para cada valor de corte, foi gerado um semivariograma, os quais foram ajustados aos modelos teóricos conforme realizado para a krigeagem ordinária (figura 5.4).

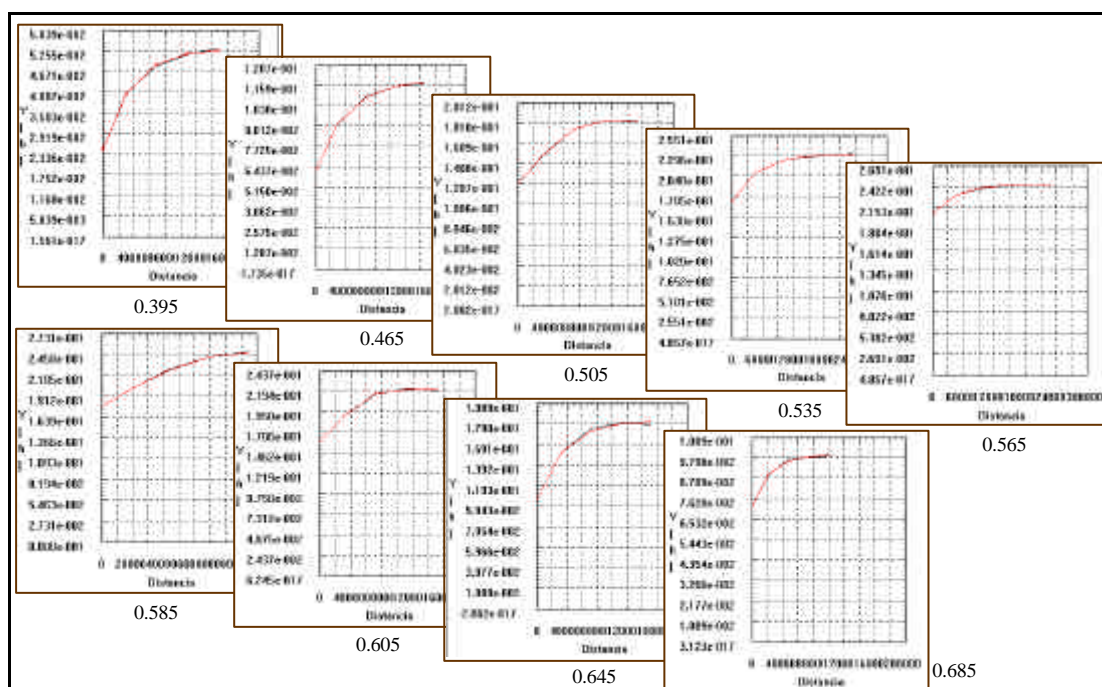


Figura 5.4 – Ajuste dos semivariogramas experimentais aos modelos teóricos.

Os valores dos atributos, foram estimados pelo valor médio e os valores de incerteza local são correspondem a dois desvios padrão, sendo definidos o mínimo de um e máximo de oito pontos na área de busca.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A **figura 6.1 a, b e c** mostra as imagem em níveis de cinza obtidas pelo interpolador média ponderada, krigagem ordinária e krigagem por indicação respectivamente.

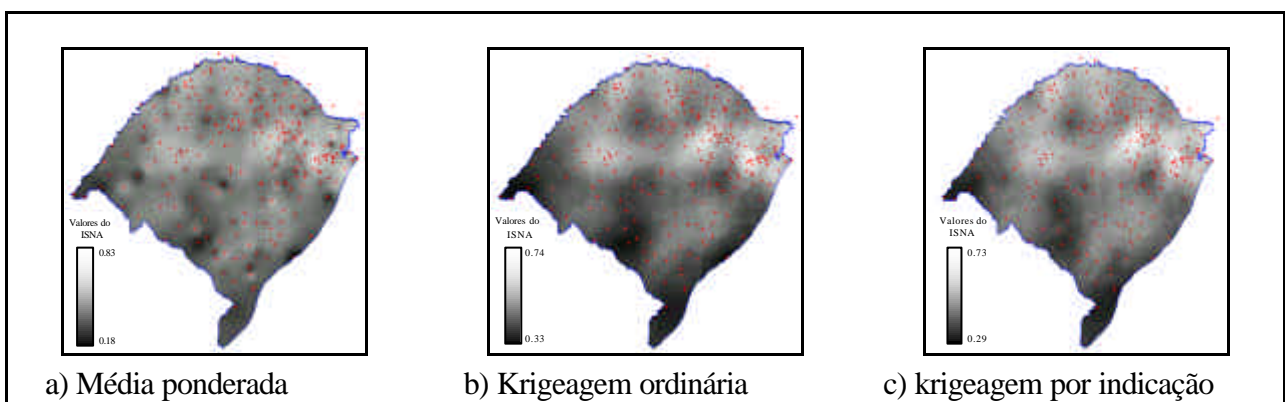


Figura 6.1 - Superfícies geradas pelos métodos de interpolação.

À primeira vista os resultados são semelhantes para os três métodos, entretanto pode ser notado que a superfície gerada pelos métodos geoestatísticos, sobretudo a krigagem por indicação é mais suave. Conforme já observado por Camargo (2000), o ponto crítico ocorre justamente onde há subestimação e superestimação do valor do atributo, que no resultado gerado pela krigagem por indicação ocorre de maneira gradual, mais coerente, portanto, com o que ocorre na natureza.

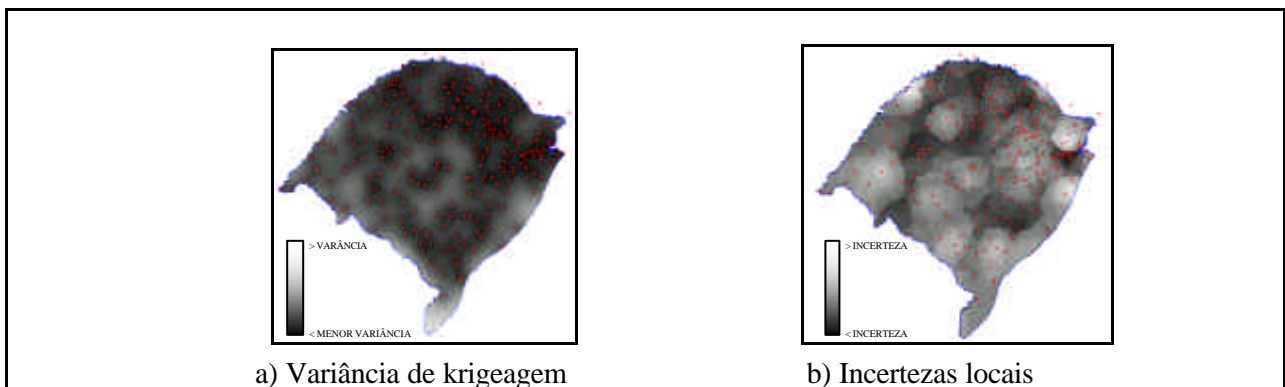


Figura 6.2 - Variância de krigagem e das incertezas locais associadas às inferências.

A variância do erro de estimação (**figura 6.2 a**) fornece informações a respeito da confiabilidade dos valores interpolados, o que representa uma importante vantagem sobre o

método da média ponderada, onde os valores inferidos são tratados como dados sem erro. Entretanto a variância de krigeagem é obtida em função do estimador e da distribuição espacial das amostras, não considerando o valor do atributo. Pode-se observar que onde os valores interpolados coincidem com os pontos amostrais a variância é zero, e aumenta com a distância dos mesmos.

Diferentemente da observação anterior, o mapa de incertezas locais (**figura 6.2 b**), fornecido pela krigeagem por indicação, utiliza a função de distribuição acumulada condicionada da variável aleatória que representa o atributo, independentemente do estimador. Assim, maiores incertezas são encontradas onde o valor do atributo tem maior variação, enquanto a ocorrência de valores com menor variação geram superfícies mais suaves caracterizando menor incerteza.

Os cartogramas abaixo (**figura 6.3**) são resultado do fatiamento das grades geradas pela média ponderada, krigeagem ordinária e krigeagem por indicação. Algumas diferenças podem ser observadas no resultado obtido pelos diferentes métodos. Tendo em vista que a condição para obtenção do seguro agrícola seja a inserção do município na área definida como favorável, algumas diferenças, embora sutis, podem ser observadas na configuração das classes, o que afeta principalmente aos municípios de menor área.

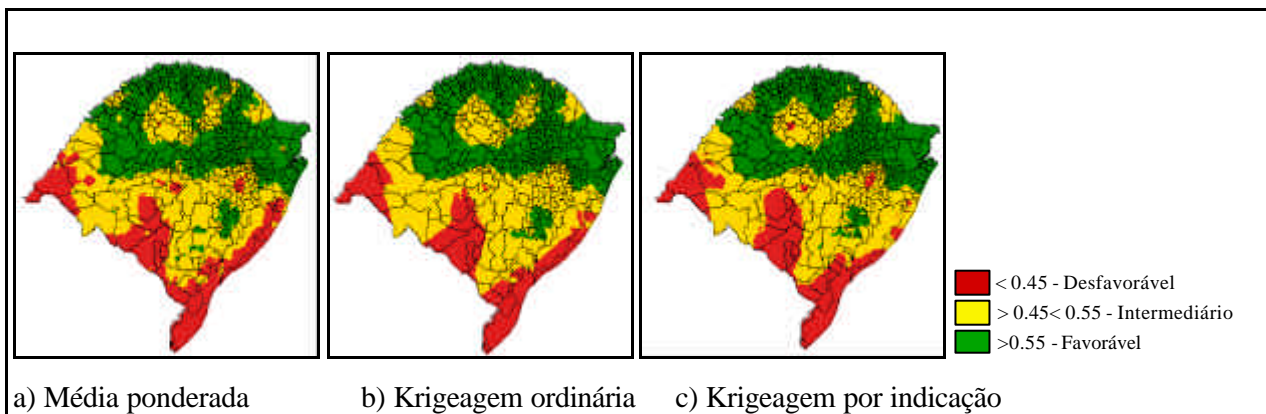


Figura 6.3 - Fatiamento das grades geradas pelos diferentes interpoladores.

7. CONCLUSÕES

O trabalho mostrou o potencial e a viabilidade da utilização de métodos geoestatísticos como alternativa aos modelos inferenciais determinísticos, na espacialização do Índice de Satisfação das Necessidades de Água, o ISNA.

Além de possibilitar a definição da forma e orientação do domínio a ser considerado na interpolação, e de atribuir pesos às amostras levando em conta a variabilidade do atributo na área, os interpoladores geoestatísticos permitem ainda modelar as incertezas associadas às inferências.

Foi possível observar ainda que, embora a krigeagem ordinária tenha se apresentado como um interpolador robusto, em relação à média ponderada, apresentou algumas desvantagens em relação a krigeagem por indicação com relação a informações relacionadas à confiabilidade dos dados interpolados. Enquanto a krigeagem ordinária considera apenas a distribuição espacial dos

pontos amostrais, a krigeagem por indicação leva em conta a variabilidade do atributo, permitindo uma análise da incerteza dos valores nos locais não amostrados.

Além disso a krigeagem por indicação destacou-se entre os métodos utilizados por ter aplicação mais ampla, pois seria possível utilizá-la ainda que a distribuição do dado aqui analisado não fosse normal, e que possuísse valores fora da tendência, o que poderia ocorrer uma vez que, neste trabalho, foi espacializado apenas o ISNA para uma data específica entre as dezessete disponíveis para a cultura do milho (*Zea mays*) ciclo médio.

Uma consideração prática diz respeito justamente a quantidade de dados e à urgência em disponibilizá-los. Tanto a krigeagem ordinária, e mais ainda, a krigeagem por indicação, são processos interativos, onde o analista busca adequar o variograma experimental a um modelo teórico, o que pode não ser um processo rápido, ainda mais se, no caso da krigeagem por indicação, forem definidos vários valores de corte.

O ISNA define a data de plantio onde o risco de perdas na agricultura seja menor. Diante da importância desse dado e das consequências práticas da sua espacialização, identificou-se a krigeagem por indicação como o método mais adequado, entre os aqui analisados, a esse atributo, por permitir, inclusive, uma análise mais confiável da qualidade da informação gerada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Assad, E. D.; Sano, E. E.; Bezerra, H. S.; Silva, S. C.; Lobato, E. J. E. Uso de Modelos Numéricos de Terreno na espacialização de épocas de plantio. In: Assad, E. D.; Sano, E. E. **Sistemas de informações geográficas. Aplicações na agricultura**. Embrapa-SPI/Embrapa Cerrados, Brasília, 1998.
- Burrough, P. A.; McDonnell R. A. **Principles of geographical information Systems**. Oxford University Press, 1998.333p.
- Camargo, E. C. G. Análise Espacial de Superfície por Geoestatística..In: **Análise Espacial**. [online]. <http://www.dpi.inpe.br/cursos/ser_301/cap3_superficies.pdf>. Nov. 2000.
- Felgueiras, C. **Modelagem ambiental com tratamento de incertezas em Sistemas de Informação Geográfica: o paradigma geoestatístico por indicação**. [online]. <<http://www.dpi.inpe.br/teses/carlos>> Nov 2000.
- Felgueiras, C. A.; Monteiro, A. M. V.; Fuks, S. D. e Camargo, E. C. G.. **"Inferências e Estimativas de Incertezas Utilizando Técnicas de Krigeagem Não Linear"**. [CD-ROM]. In: V Congresso e Feira para Usuários de Geoprocessamento da América Latina, 7, Salvador, 1999a. **Anais**. Bahia, gisbrasil'99. Seção de Palestras Técnico-Científicas.
- Fuks, S. D. Novos Modelos para mapas derivados de informações de solos. In: Assad, E. D.; Sano, E. E. **Sistemas de informações geográficas. Aplicações na agricultura**. Embrapa-SPI/Embrapa Cerrados, Brasília, 1998.

APÊNDICE

Krigeagem Ordinária

Plano de Informação	Nº de Lags	Incremento	Tolerância	Modelo de Ajuste
Am513	5	30000	14900	Exponencial

Krigeagem Indicatriz

Plano de Informação	Valor de Corte	Nº de Lags	Incremento	Tolerância	Modelo de Ajuste
Am513	0,395	3	40000	18100	Exponencial
	0,465	3	40000	20000	Exponencial
	0,505	3	42000	21000	Esférico
	0,535	3	65000	32500	Exponencial
	0,565	3	64000	32000	Exponencial
	0,585	3	26000	13000	Esférico
	0,605	3	41000	17000	Esférico
	0,645	3	39500	10000	Exponencial
	0,685	3	28000	11500	Exponencial