

Revista Brasileira de Cartografia (2012) Nº 64/1: 69-82
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

CLASSIFICAÇÃO FUZZY DE VERTENTES POR THIN-PLATE SPLINE E KRIGAGEM COM COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

*Fuzzy Classification of Slopes using Thin-Plate Spline and Kriging
with Comparison of Results*

**Adilson Berveglieri¹, Messias Meneguette Junior²,
Marco Antônio Piteri² & Daniela Souza dos Anjos¹**

Universidade Estadual Paulista – UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia - Campus Presidente Prudente
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
aberveg@yahoo.com.br
dsanjos@yahoo.com.br

Universidade Estadual Paulista – UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia - Campus Presidente Prudente
Departamento de Matemática, Estatística e Computação
messias@fct.unesp.br
piteri@fct.unesp.br

Recebido em 17 Março, 2011/ Aceito em 01 Maio, 2011
Received on March 17, 2011/ Accepted on May 01, 2011

RESUMO

Dentre várias morfologias da superfície terrestre, em particular as vertentes, que consistem em expressões geomorfológicas moldadas por fatores naturais e pelo próprio homem. Suas formas configuram a inclinação do terreno em relação ao plano horizontal e têm ligação direta com as ações de escoamento e infiltração de água no solo. São fundamentais na prevenção e resolução de problemas associados ao relevo, tais como construção civil, uso do solo entre outros. A identificação da vertente em côncava, convexa ou retilínea permite a distinção de áreas conforme sua curvatura vertical. Assim, por meio de modelos digitais de terrenos, representando tais vertentes, geram-se malhas interpoladas pelas funções: *thin-plate spline*, a qual possui características de suavização e krigagem que, além da suavidade, considera a dependência espacial. Após, as classificações desses modelos são feitas, obedecendo-se à inferência *fuzzy*, baseada em funções de pertinência que definem classes a partir do cálculo da inclinação e da curvatura do terreno. Em seguida, três áreas de Presidente Prudente/SP são modeladas. E para fins de validação, os resultados das representações computacionais são comparados com os respectivos mapas geomorfológicos dessas áreas, de maneira que possam ser identificadas regiões de vertentes semelhantes. No final, os resultados dos dois casos de interpolação são confrontados, e as considerações, pontuadas.

Palavras-chave: Curvatura de Vertente, Interpolação Geoestatística, MDT.

ABSTRACT

Among various morphologies of the land surface, in specific the slopes, that consist in geomorphological expressions molded by natural and men effects. Their shapes set the declivity of the ground in the horizontal plane and they have direct link with actions of flow and infiltration of water into the soil. They are essentials in preventing and resolving problems related to relief, as land use, like buildings construction, and others. Indentify slopes in concave, convex or straight form allows to distinct areas based on its curvature. Thus, using digital terrain models to represent these slopes, grids are generated by estimator functions: thin-plate spline which has characteristics of smoothing and kriging, that besides smoothing, also considers spatial dependence. After that, the classification models are made according to fuzzy inference through membership functions, that define classes from the calculation of the terrain slope and curvature. The tests were developed in three Presidente Prudente/SP areas. And for validation purposes, the results of the computational representations are compared with geomorphological maps of these areas. Therefore, slopes can be identified by similarity. Finally, two cases of interpolation were compared, and considerations were made.

Keywords: Slope Curvature, Geostatistical Interpolation, DTM.

1. INTRODUÇÃO

A superfície terrestre caracteriza-se por diferentes formas: elevações e depressões que compõem o relevo. No estudo dessas formas, da gênese, composição material e processos atuantes, a Geomorfologia apresenta-se como a ciência responsável. No caso das vertentes ou encostas, consideradas como unidades elementares do relevo e fundamentais no desenvolvimento das paisagens, o interesse atinge também profissionais como engenheiros, agrônomos entre outros, relacionados à agricultura, mineração e atividades similares.

As vertentes representam um elemento básico no estudo de processos de erosão e acumulação, ocupando grande parte da superfície. Indicam a inclinação do terreno em relação ao plano horizontal e têm ligação direta com as ações de escoamento e infiltração da água no solo. Possuem formas muito variadas; no entanto, para efeito didático, podem ser agrupadas em: côncava, convexa e retilínea (GUERRA, 2001). Silveira et al. (2005) descrevem essas formas como:

- **Côncava:** apresenta ângulo de inclinação decrescente da parte superior até a parte inferior da vertente;
- **Convexa:** tem ângulo de inclinação crescente da parte superior até a parte inferior da vertente;
- **Retilínea:** segmento sem curvatura na direção principal (vertical).

A Fig. 1 fornece uma ilustração dessas formas com fluxos de água associados. A modelagem da vertente é resultante da ação de diversos fatores, sendo a desagregação das rochas e a decomposição química os elementos inicialmente atuantes (GUERRA, 2001).

No entendimento das ações que ocorrem sobre as vertentes, alguns aspectos devem ser considerados, como orientação, curvatura vertical e curvatura horizontal. A orientação corresponde a uma medida de ângulo horizontal da direção esperada do escoamento da superfície. No caso da curvatura vertical, esta se relaciona com os processos de transporte de sedimentos e acúmulo de umidade, sob influência da gravidade. Em se tratando da curvatura horizontal, faz referência às características divergente ou convergente do fluxo da matéria sobre a superfície (FLORENZANO, 2008).

Diversas aplicações que dependem de características topográficas de uma região de estudo efetuam a modelagem do terreno. A representação do relevo é de fundamental importância no processo cartográfico. Muitos termos e definições aparecem na literatura, mas no contexto deste trabalho, é considerado o termo Modelo Digital de Terreno

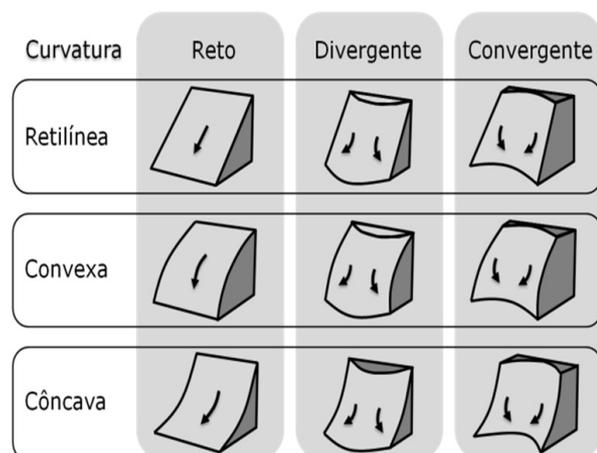


Fig. 1 – Curvatura da vertente em perfil com fluxo de água associado.

(MDT) o qual, segundo El-Sheimy et al. (2005), é uma representação computacional de uma parte da superfície contínua formada por um conjunto de pontos selecionados e definidos pelas coordenadas (x, y, z) .

Normalmente a produção e o uso de um MDT envolvem três etapas básicas: amostragem, geração e aplicação. A amostragem consiste em adquirir um conjunto de dados que represente a variação do fenômeno com comportamento espacial. Já a geração envolve a criação de estruturas de dados e a definição de superfícies de ajustes, visando uma representação contínua do fenômeno a partir das amostras. A aplicação, por sua vez, viabiliza o estudo e análise de um determinado fenômeno sem a necessidade de se trabalhar no local da área modelada. Os MDTs possuem várias aplicações em geoprocessamento, permitindo análises tanto qualitativas como quantitativas, além de servirem em casos de simulações e tomadas de decisão (FELGUEIRAS, 2001).

Diante disso, com base nas particularidades das vertentes, o propósito geral deste trabalho é desenvolver uma metodologia para construir uma representação computacional do relevo com áreas classificadas pela inferência *fuzzy*, de acordo com sua curvatura em perfil. Tudo isso mediante aplicação dos interpoladores sobre MDTs: krigagem ordinária e *Thin-Plate Spline* (TPS), sendo que ambos possuem características de suavização da superfície.

2. FUNÇÕES INTERPOLADORAS, CÁLCULO DA CURVATURA E INFERÊNCIA FUZZY

A seguir, são apresentados, resumidamente, os conceitos relacionados à interpolação dos MDTs pelas funções TPS e krigagem, sendo esta última de origem geoestatística. Também é tratado o cálculo da curvatura de vertente em perfil, cuja operação é realizada sobre as células da grade interpoladora, e a inferência *fuzzy*, a qual define as categorias para a classificação do relevo. Esses conceitos são os principais fundamentos do presente trabalho.

2.1 Thin-plate spline

De acordo com Bookstein (1989) e Barbosa et al. (2008), é uma função matemática de estimação, podendo ser ilustrada pela Fig. 2 como uma chapa fina de metal que se estende infinitamente

e deforma-se conforme o deslocamento dos pontos de controle definidos.

A função radial $U(r)$ de referência da TPS é dada, segundo Bookstein (1989), pela Equação (1):

$$Z(x,y) = -U(r) = -r^2 \log r^2 \quad (1)$$

em que $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ denota a distância cartesiana até a origem.

A expressão que atua sobre os pontos de controle (x_i, y_i, z_i) , com $i = 1, 2, \dots, n$ para implementação computacional via TPS é dada pela expressão (2):

$$Z(x, y) = a_0 + a_1x + a_2y + \sum_{i=1}^n F_i r_i^2 \ln r_i^2 \quad (2)$$

Com $Z(x_k, y_k) = z_k$, $k = 1, 2, \dots, n$ em que $r^2 = (x - x_i)^2 + (y - y_i)^2$ e F_i, a_0, a_1 , e a_2 são os $n + 3$ coeficientes.

O resultado da interpolação global é uma superfície suave.

2.2 Geoestatística

O interesse por parte da Geoestatística está no desenvolvimento e aplicação de modelos para representar fenômenos naturais cujas propriedades variam conforme a localização espacial dos pontos amostrados.

O conceito essencial de variável regionalizada, inicialmente definido por Matheron

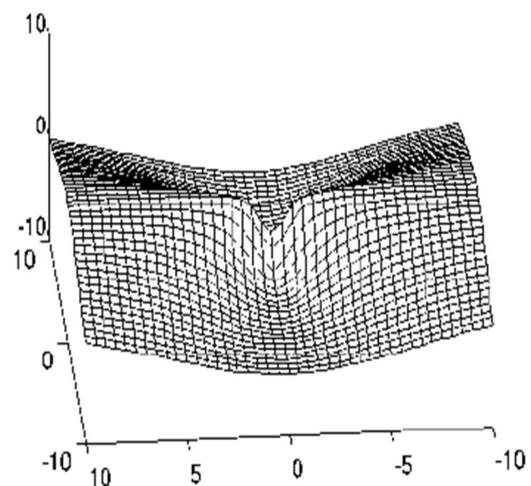


Fig. 2 – Chapa final de metal com pontos de pressão sobre a superfície, como analogia da TPS. Fonte: Adaptado de Castanho e Tozzi (1996).

(1971), tratava do aspecto aleatório, quando os valores observados variam significativamente entre si e do aspecto estruturado, quando segue alguma lei espacial, ou seja, um valor elevado tem provavelmente perto de si outro valor elevado, ao invés de um valor baixo. Isto pressupõe a existência de correlação entre os dados e, portanto, não devem ser estudados separadamente. Definir uma variável regionalizada consiste em descrevê-la sem interpretações probabilísticas. Dessa forma, a regionalização representa o caráter estruturado dos fenômenos espaciais, sendo conduzido pelas funções aleatórias cujas variáveis, também ditas aleatórias, podem assumir certos valores de acordo com determinada lei de probabilidade. E para fazer inferências estatísticas, algumas hipóteses suplementares sobre as funções aleatórias são levantadas, as chamadas hipóteses restritivas (ANDRIOTTI, 2003).

2.2.1 Krigagem

A krigagem compõe um conjunto de técnicas geoestatísticas que estima valores de variáveis distribuídas no espaço (e/ou no tempo), a partir dos dados adjacentes à medida que são considerados independentes pelo semivariograma (LANDIM, 2003).

Na aplicação de técnicas de krigagem, segundo Isaaks e Srivastava (1989), são assumidas hipóteses como:

- **estacionaridade estrita:** os componentes que controlam o comportamento da variável regionalizada agem igualmente em toda área de estudo;

- **estacionaridade de 2ª ordem:** Existe uma esperança matemática, $E[Z(x)] = m$, para todo x ,

independente da posição de x . E para todo par $\{Z(x), Z(x+h)\}$ existe covariância, conforme a distância h ;

- **hipótese intrínseca:** Existe $E[Z(x)] = m$ para todo x , independente da posição e para todo h , o incremento $\{Z(x), Z(x+h)\}$ tem variância limitada, não importando a posição x .

Um ponto importante na modelagem da continuidade espacial é a determinação dos pesos, que são calculados com base: na distância entre a amostra e o ponto estimado; na continuidade espacial e na disposição dos dados. O suporte para a representação quantitativa do fenômeno regionalizado é obtido por meio de um semivariograma, como na Fig. 3, em que $Z(x)$ denota a posição dos componentes (x_1, y_1) ; $Z(x+h)$, o valor amostrado na posição (x_2, y_2) e h , o vetor distância entre os pontos.

Adotando $N(h)$ como o número de pares de observações separados pela distância \bar{h} , tem-se o semivariograma estimado da Equação (3):

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

Cujos componentes, apresentados na Fig. 3(b), são: alcance (a), que indica a partir de onde as amostras tornam-se independentes; efeito pepita (C_0), valor da função na origem, representando a descontinuidade; patamar (C), valor no qual ocorre a estabilidade no campo aleatório e contribuição (C_I), diferenças espaciais entre os valores de uma variável analisada em dois pontos com distâncias sucessivamente maiores.

Entre as diversas técnicas de krigagem existentes, a krigagem ordinária representa uma

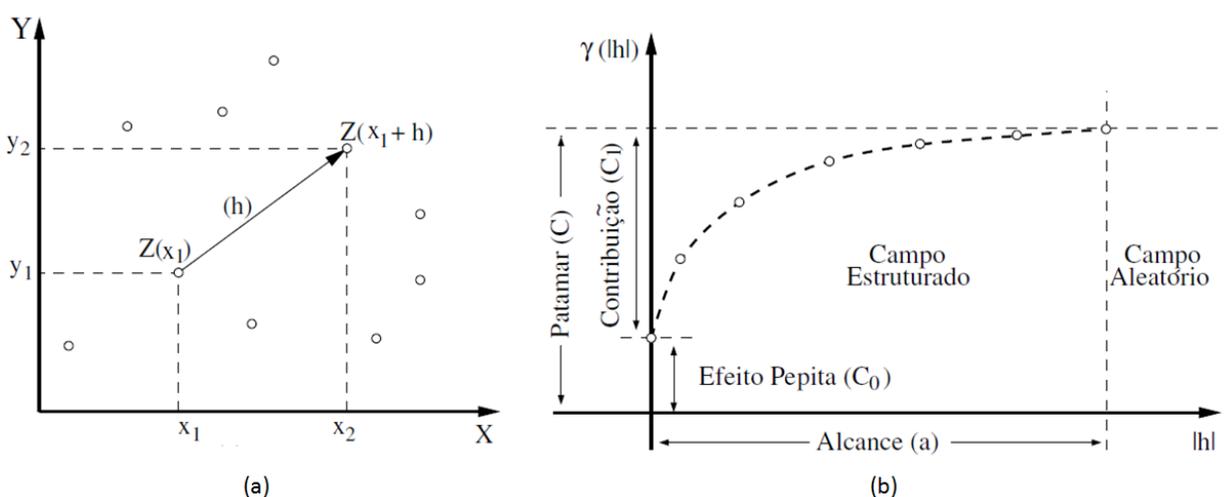


Fig. 3 – Semivariograma: (a) distribuição espacial; (b) componentes. Fonte: Camargo et al. (2004).

forma de estimação linear para uma variável regionalizada, obedecendo à hipótese intrínseca, o que não requer conhecimento prévio da média e admite a estacionaridade local (LANDIM, 2003), ou seja, uma variável pode ser tendenciosa em todo o seu domínio, mas contém alguma parte estacionária (ANDRIOTTI, 2003). A Equação (4) fornece o estimador (*) da krigagem ordinária, sendo $Z(x_i)$ os dados amostrados; λ_i , os pesos e n , o total de dados.

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (4)$$

Em geral, os fenômenos estudados pelas geociências apresentam anisotropia, o que significa haver uma direção com maior continuidade espacial na distribuição dos elementos. Diferentemente da isotropia, que considera a continuidade espacial igual para qualquer direção. A detecção da anisotropia pode ser percebida utilizando-se um mapa variográfico ou um conjunto de semivariogramas composto por diferentes direções, normalmente, para as quatro direções convencionais (0°, 45°, 90° e 135°).

A modelagem, obtida pelo semivariograma, é experimental, sendo calculada pela Equação (3), com manipulação dos parâmetros indicados na Fig. 3(b) e pelo ajuste a algum modelo teórico com patamar, que pode ser do tipo: esférico, exponencial ou gaussiano, admitindo-se, ainda, a combinação entre eles.

2.3 Cálculo da Curvatura de vertente em perfil

A superfície da Terra pode ser sintetizada pela combinação de elementos de sua forma, definidos como unidades de relevo de planos homogêneos e curvaturas em perfil. A declividade, que na literatura geomorfológica é chamada de gradiente, consiste no cálculo da primeira derivada de uma superfície sobre um MDT, contendo os valores de magnitude e direção (LI et al, 2005; HENGL et al., 2003).

A segunda derivada descreve a razão de variação do terreno e, conseqüentemente, sua curvatura em perfil em termos côncavo, convexo e retilíneo, sendo calculada computacionalmente com base na Fig. 4 e expressa pelas Equações de (5) a (10).

$$G = \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{z_3 + z_6 + z_9 - z_1 - z_4 - z_7}{6d} \quad (5)$$

$$H = \frac{\partial f}{\partial y} = \frac{z_1 + z_2 + z_3 - z_7 - z_8 - z_9}{6d} \quad (6)$$

$$D = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} = \frac{z_1 + z_3 + z_4 + z_6 + z_7 + z_9 - 2(z_2 + z_5 + z_8)}{3d^2} \quad (7)$$

$$E = \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = \frac{z_1 + z_2 + z_3 + z_7 + z_8 + z_9 - 2(z_4 + z_5 + z_6)}{3d^2} \quad (8)$$

$$F = \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} = \frac{z_3 + z_7 - z_1 - z_9}{4d^2} \quad (9)$$

$$C_{\text{perfil}} = \frac{G^2 D + 2GHF + H^2 E}{(G^2 + H^2)(1 + G^2 + H^2)^{1,5}} \quad (10)$$

em que

G é a 1ª derivada na direção x ;

H é a 1ª derivada na direção y ;

D é a 2ª derivada na direção x ;

E é a 2ª derivada na direção y ;

F é a 2ª derivada na direção diagonal;

z_5 representa o ponto de referência;

d é o espaçamento entre os pontos da grade interpoladora.

A interpretação do resultado pode ser ilustrada como na Fig. 5 em que um valor positivo indica convexidade e, um negativo, concavidade. Entretanto, é importante ressaltar que, em um caso retilíneo, o valor deve ser zero, mas tal ocorrência na natureza raramente acontece. Por isso, determina-se uma pequena faixa em torno do zero para que a característica retilínea seja percebida.

Ainda em relação ao resultado, uma atenção deve ser dada ao espaçamento d , pois a curvatura

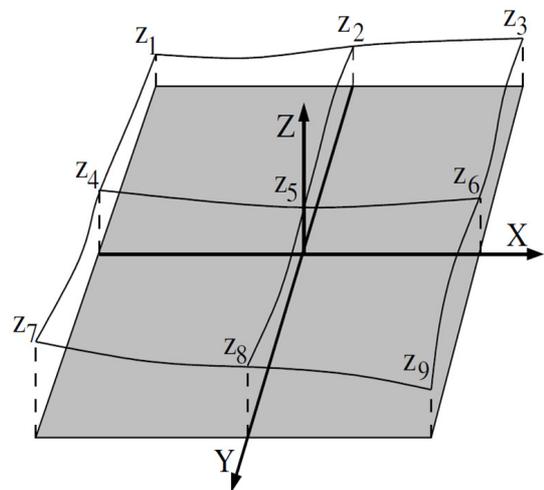


Fig. 4 – Grade MDT para o cálculo da curvatura.

está estritamente correlacionada a esse valor. Conforme a distância é alterada, resultados diferentes podem ocorrer.

2.4 Inferência Fuzzy

A forma de se lidar com conceitos imprecisos foi proposta por Zadeh (1965), apresentando o conjunto *fuzzy* como uma maneira de caracterizar classes cujos limites não são rígidos e tendo uma função de pertinência para mapear os elementos de um domínio X para um número real no intervalo $[0, 1]$. Desse modo, o conjunto *fuzzy* apresenta-se como pares ordenados em que o primeiro elemento é $x \in X$, e o segundo, $\mu_A(x)$, é o grau de pertinência de x em A que associa x no intervalo $[0, 1]$, expresso matematicamente como $A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in X\}$.

No momento da aplicação, algumas classes de funções de pertinência são mais frequentemente usadas, como as lineares por partes: triangular e trapezoidal, exemplificadas na Fig. 6 e formalizada nas Equações (11) e (12), de acordo com Benini e Meneguette Junior (2009).

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{se } x \in]m, b] \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (11)$$

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{se } x < a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{se } x \in [a, m] \\ 1, & \text{se } x \in]m, b] \\ \frac{b-x}{b-n}, & \text{se } x \in [n, b] \\ 0, & \text{se } x > b \end{cases} \quad (12)$$

Em sistemas que fazem uso da lógica *fuzzy*, as informações geralmente são processadas por meio de operações sobre os conjuntos e, conforme Zadeh (1965), as operações básicas são: união, interseção e complemento.

O funcionamento de um sistema de inferência *fuzzy* pode ser esquematizado como na Fig. 7.

No esquema, as entradas são oriundas de medições ou observações (conjunto de dados), o que requer um mapeamento dos dados para os conjuntos *fuzzy*, etapa de fuzziificação. Nesta etapa,

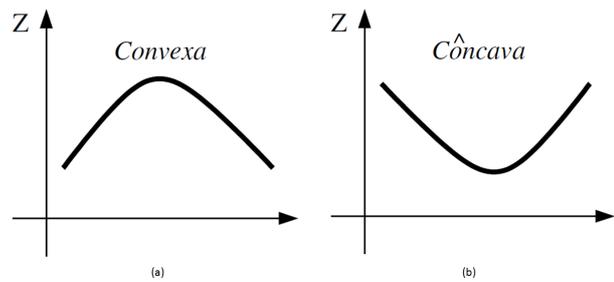


Fig. 5 – Sinal da curvatura em perfil: (a) positivo; (b) negativo.

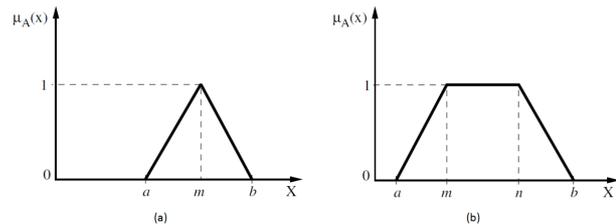


Fig. 6 – Funções: (a) triangular; (b) trapezoidal.

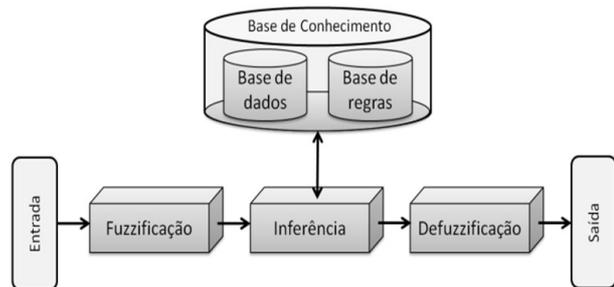


Fig. 7 – Estrutura de um sistema *fuzzy*.

também são ativadas as regras relevantes para o tipo de situação envolvida.

A base de conhecimento consiste em um conjunto de regras *fuzzy*, fornecidas por especialistas a respeito do assunto, sob a forma de sentenças linguísticas (“se..., então”), dando o suporte fundamental ao desempenho de todo o sistema. Além disso, a base de conhecimento também é composta por: uma base de dados na qual ficam as variáveis linguísticas; as definições do conjunto universo e o conjunto de funções de pertinência.

Na inferência, são realizadas as operações com os conjuntos *fuzzy*. Os conjuntos *fuzzy* de entrada referem-se aos antecedentes das regras e, os de saída, aos consequentes, podendo ser determinados previamente ou gerados automaticamente a partir dos dados. Vale dizer que as definições desses conjuntos de entrada e saída devem ser feitas com atenção, pois a eficiência do

sistema depende do número de conjuntos e de sua forma.

Tendo obtido o conjunto *fuzzy* de saída por intermédio da inferência, estágio de defuzzificação, faz-se a interpretação da informação, traduzindo o estado da variável de saída para um valor numérico, já que em aplicações práticas, saídas precisas são necessárias.

Enfim, com base nesses temas abordados, foram geradas representações computacionais para a superfície do relevo de modo que a curvatura da vertente pudesse ser identificada e classificada por meio da inferência *fuzzy*, conforme os procedimentos apresentados, na próxima seção.

3. RECURSOS MATERIAIS E METODOLOGIA

No desenvolvimento deste estudo, foram realizadas implementações em ambiente C++ Builder, para geração da malha interpolada; utilização do software Variowin, como descrito por Pannatier (1996) e GS+, para a modelagem da krigagem; Matlab, na inferência *fuzzy* e também uma base de dados digital planialtimétrica do município de Presidente Prudente/SP na escala de 1:10.000, juntamente com seus mapas geomorfológicos na escala 1:25.000.

Pelos procedimentos metodológicos, ilustrados na Fig. 8, são feitas operações, por meio da inferência *fuzzy*, entre as variáveis linguísticas grau de curvatura e tipo de curvatura, definindo as categorias: côncava, côncava-retilínea, retilínea, convexa-retilínea e convexa para a classificação das vertentes.

De outro ponto no esquema apresentado, parte-se de dados topográficos amostrados por isolinhas cujas coordenadas são expressas na forma cartesiana. Com esses dados, são interpoladas as grades do MDT tanto para a TPS quanto para a krigagem, independentemente. Em seguida, faz-se o cálculo da curvatura da vertente em perfil, com base nos valores de cada célula do modelo.

O resultado do cálculo da curvatura é classificado segundo as classes formadas pela inferência *fuzzy*, contemplando a etapa classificação *fuzzy* e resultando no MDT classificado.

Por último, cada representação computacional obtida, com fins de validação, é comparada a um mapa geomorfológico correspondente, o qual descreve a mesma área em temas de compartimentos de relevo.

4. APLICAÇÃO DA INFERÊNCIA FUZZY

A aplicação da inferência *fuzzy* foi processada com auxílio da *toolbox* “Sistema de Inferência *Fuzzy*” (SIF) do Matlab. Assim, estabeleceram-se dois conjuntos, mostrados na Fig. 9, com as seguintes associações às variáveis linguísticas: grau de curvatura (inexpressivo, baixo e alto) e tipo de curvatura (positiva, nula e negativa),

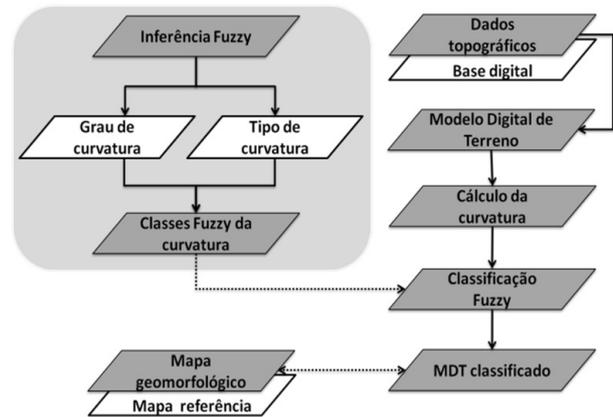


Fig. 8 – Estrutura metodológica.

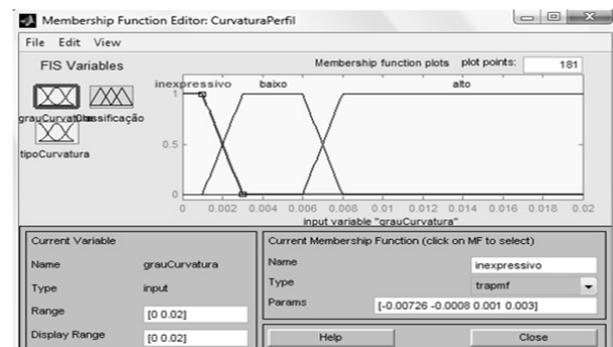
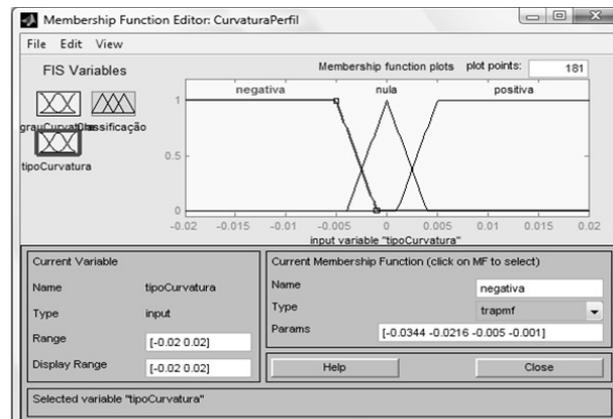


Fig. 9 – Definição dos conjuntos *fuzzy* de variáveis linguísticas com suas funções de pertinência associadas, no SIF do Matlab.

ambos apoiados em testes experimentais, conforme Anjos (2008).

Sobre esses conjuntos foram determinadas regras e realizadas operações do tipo:

· “Se grau de curvatura é inexpressivo e tipo de curvatura é negativa, **então** classificação retilínea”;

· “Se grau de curvatura é alto e tipo de curvatura é positiva, **então** classificação convexa”...

Dessa forma, aplicando-se as funções de pertinências triangular e trapezoidal, pode-se chegar aos intervalos de valores expostos na Tabela 1.

A Tabela 1 obedece à determinação da Equação (10) que indica curvatura negativa, como côncava, e positiva, como convexa; além disso permite a associação dos valores próximos ao zero, como retilíneo.

5. TESTES EM ÁREAS DE ESTUDO

A fim de realizar testes e avaliar os resultados, a metodologia foi aplicada em três áreas, denominadas Área A, Área B e Área C, com no máximo 1 km² e em escala 1:10.000. As disposições de suas curvas de nível são mostradas pela Fig. 10.

5.1 Classificação TPS

Para processamento da interpolação pela TPS, os dados amostrados são submetidos à Equação (2), a qual adensa a grade do MDT, segundo as características dessa função interpoladora. Em seguida, pelo cálculo da curvatura e com base nas categorias *fuzzy*, a classificação é obtida, dando como resultado as malhas da Fig. 11.

5.2 Classificação krigagem ordinária

A krigagem, diferentemente da TPS, não é automática, exige manipulações diretas sobre os parâmetros das modelagens. Assim sendo, tais manipulações foram executadas de acordo com as características anisotrópicas, identificadas via mapas variográficos, que indicaram, em todos os casos, dependência espacial mediante concentração do valor de $\gamma(h)$, bem como as direções com maior e menor continuidade espacial (Fig. 12), isto é, os valores menores de (representado pelas cores frias) indicam a direção com menor continuidade espacial, por outro lado, os valores maiores (cores quentes) indicam a direção com maior continuidade.

Tabela 1. Intervalos das classes de vertentes.

Classe	Intervalo
Côncava	$] - \infty , - 0,01 [$
Côncava-retilínea	$[- 0,01 , - 0,005]$
Retilínea	$] - 0,005 , + 0,005 [$
Convexa-retilínea	$[+ 0,005 , + 0,005]$
Convexa	$] + 0,01 , + \infty [$

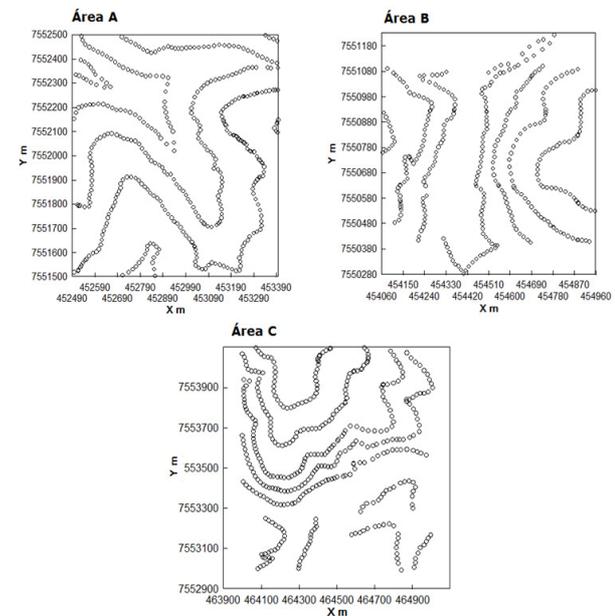


Fig. 10 – Curvas de nível das Áreas A, B e C, sendo compostas, respectivamente, por 396, 330 e 417 pontos.

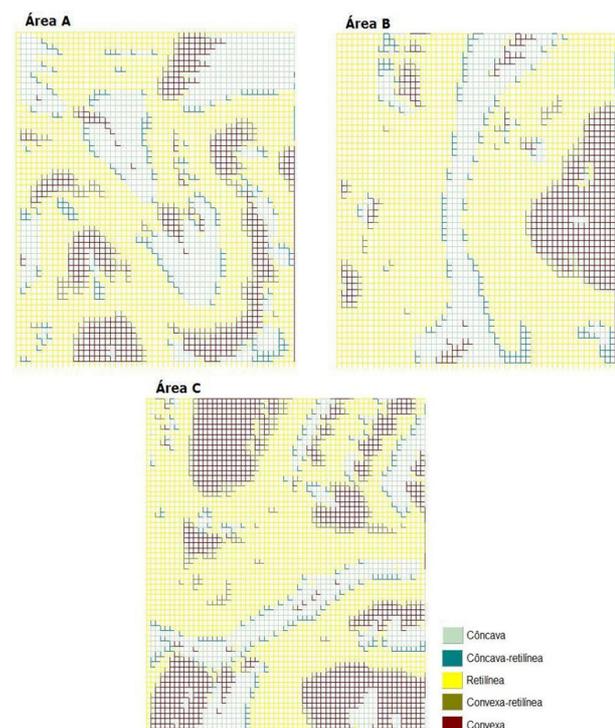


Fig. 11 – Classificação do MDT pela TPS.

Por consequência do procedimento iterativo, obtiveram-se os valores ajustados da Tabela 2, revelando como o modelo mais adequado para as representações espaciais, o esférico e também identificando as direções com maior e menor continuidade espacial, necessárias na composição do modelo anisotrópico.

A Fig. 13 mostra os semivariogramas direcionais das três áreas consideradas, indicando a não similaridade entre as quatro curvas em todos os gráficos, o que reforça a condição de anisotropia.

Assim, de posse dos parâmetros ajustados e juntamente com as classes fuzzy, procedeu-se a interpolação krigagem ordinária no MDT, gerando as representações da Fig. 14.

Dessa forma, obtiveram-se os MDTs classificados das três áreas de estudo para os dois tipos de interpoladores, independentemente.

6. VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

Terminado o processo de classificação, há necessidade de validar os resultados. Nesse sentido, uma forma é comparar os produtos gerados pela

Tabela 2. Parâmetros ajustados.

Área	Direção	Modelo	Alcance (m)	Efeito Pepita	Contrai-buição
A	45°	esférico	362	0	85
	135°	esférico	570	1	80
B	0°	esférico	290	0	110
	90°	esférico	650	0	81
C	45°	esférico	800	0	231
	135°	esférico	260	0	260

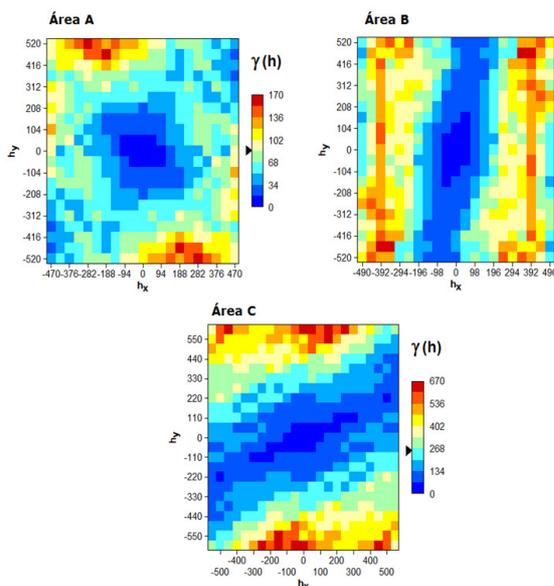


Fig. 12 – Mapas variográficos das áreas, indicando dependência e direção da continuidade espacial.

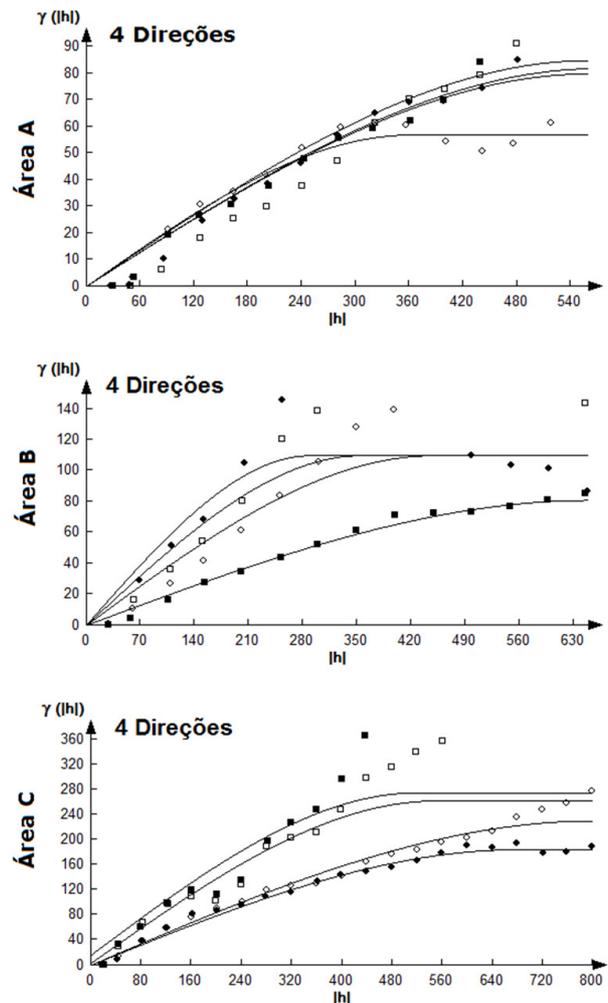


Fig. 13 – Semivariogramas direcionais.

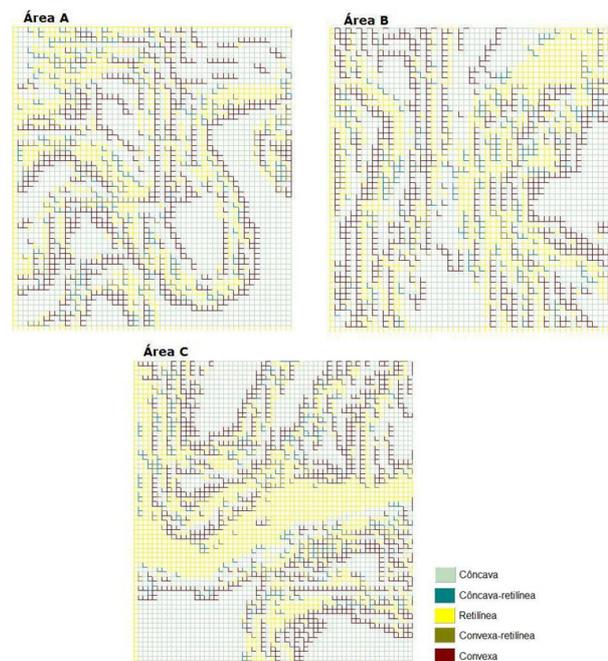


Fig. 14 – Classificação do MDT pela krigagem.

implementação com mapas geomorfológicos das áreas de referência. Esses mapas apresentam símbolos associados à curvatura da vertente e traduzem visão de especialistas, os geomorfólogos.

O procedimento de validação consiste em subdividir o produto do MDT semelhantemente ao mapa, em quadrantes e, em seguida, fazer a correspondência destes em relação à posição entre as duas representações.

Pela associação, localizam-se os símbolos classificatórios das vertentes nos mapas e os confrontam com a respectiva área no MDT. Dessa forma, é possível estabelecer numericamente uma margem de acerto e, portanto, validar os resultados.

Os critérios adotados para avaliação do MDT baseiam-se no enquadramento das vertentes associadas aos termos: corretas, imprecisas e incorretas, definidos como:

- **Corretas:** ocorre correspondência quanto à classificação entre os quadrantes do mapa e do MDT, sem qualquer discordância;

- **Imprecisas:** a correspondência entre os quadrantes dá-se pela formação de pequenas áreas que se aproximam aos mapas geomorfológicos;

- **Incorretas:** discordância total entre a associação dos quadrantes.

De acordo com Nunes et al. (2006), a morfoescultura da região utilizada apresenta um padrão de forma como sendo espigões rebaixados, constituídos por relevos de colinas côncavo-convexas com predomínio de vales do tipo V e com declividade entre 0 e 20%. Os compartimentos de relevo dos mapas geomorfológicos seguem as classes representadas pela Tabela 3.

Desse modo, cada área de estudo é comparada com seu respectivo mapa geomorfológico para ambas as interpolações, krigagem e TPS.

A Fig. 15 mostra a comparação entre os mapas geomorfológicos das três áreas com seus respectivos MDTs krigados, e os valores dessa comparação estão na Tabela 4 em que constam 15 vertentes corretas, o que representa 65,2%; 4 casos de imprecisão ou 17,4% e também 2 vertentes incorretas ou 17,4%.

Repetindo o mesmo procedimento para validação do MDT pela TPS, a Fig. 16 fornece o confronto entre os mapas e suas representações computacionais.

Numericamente a Tabela 5 aponta como resultado: 13 vertentes corretas, equivalentes a 56,5%; 3 imprecisas, iguais a 13,1% e 7 casos incorretos, iguais a 30,4%.

Nos testes de classificação das áreas, observa-se que há correspondência entre os mapas e os MDTs. Obviamente tal correspondência não é feita pontualmente, mas por aproximações de suas características que foram percebidas e identificadas de acordo com os critérios de vertentes corretas, imprecisas e, de modo geral, são comentados na sequência.

Tabela 3. Morfoescultura do Planalto Ocidental Paulista/SP.

Compartimento de relevo	Tipo logia da formação do relevo
 Topo suavemente ondulado das colinas convexizadas (430 a 480 m)	- Tipos com vexas com declividade médias de 2% a 10%
 Domínio das vertentes côncavo, convexas e retilíneas (420 a 450 m)	- Vertente côncava com declividade aproximada de 5% a 20% - Vertente convexa com declividade aproximada de 10% a 20% - Vertente retilínea com declividade de 5% a 20%
 Planície aluvial e alvéolos (380 a 420 m)	- Fundos de vales com declividade entre 0 e 5%

Fonte: Nunes et al. (2006).

Tabela 4. Comparação entre os mapas geomorfológicos e os MDTs Krigados.

Classe de vertente	Mapa	MDT		
		Corretas	Imprecisas	Incorretas
Convexa	3	2	1	0
Retilínea	10	6	2	2
Côncava	10	7	1	2
Total	23	15	4	4
Percentual	100%	65,20%	17,40%	17,40%

Tabela 5. Comparação entre os mapas geomorfológicos e os MDTs TPS.

Classe de vertente	Mapa	MDT		
		Corretas	Imprecisas	Incorretas
Convexa	3	1	1	2
Retilínea	10	6	1	1
Côncava	10	6	1	4
Total	23	13	3	7
Percentual	100%	56,50%	13,10%	30,40%

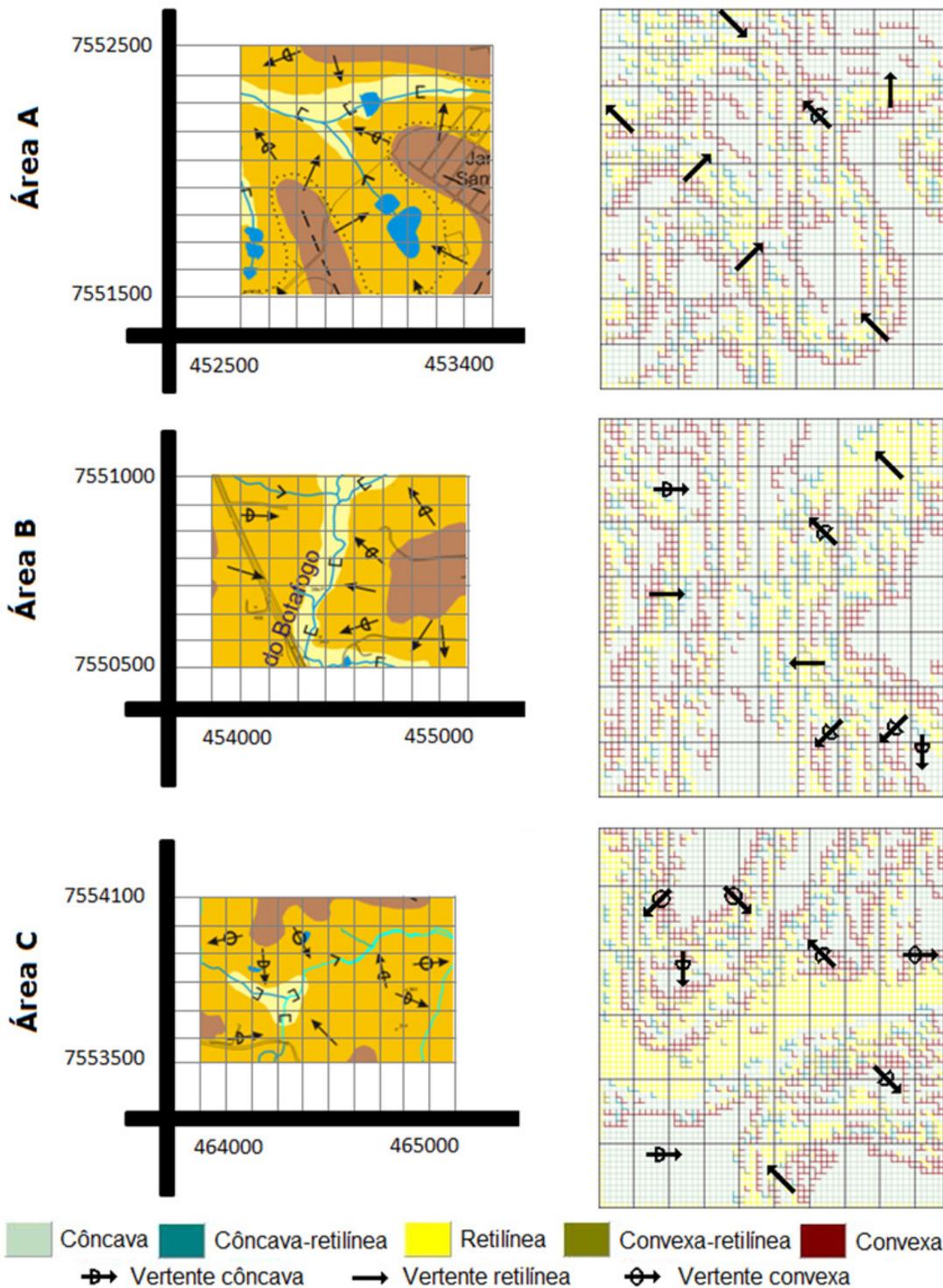


Fig. 15 – Comparação entre os mapas geomorfológicos e o MDT com krigagem.

7. CONCLUSÕES

A metodologia provê a classificação de áreas quanto à curvatura da vertente em perfil cujas classes principais são: convexa, retilínea e côncava. Isto a partir de dados amostrados por curvas de nível e operados sobre modelos digitais de terrenos com

as interpolações krigagem e TPS, os quais posteriormente são submetidos à inferência fuzzy.

As interpolações por meio da krigagem permitem pontuar alguns aspectos sobre a espacialidade dos dados, como: a disposição das curvas de nível influencia diretamente na definição dos parâmetros de modelagem, e apesar das informações indicarem às vezes alguma direção com

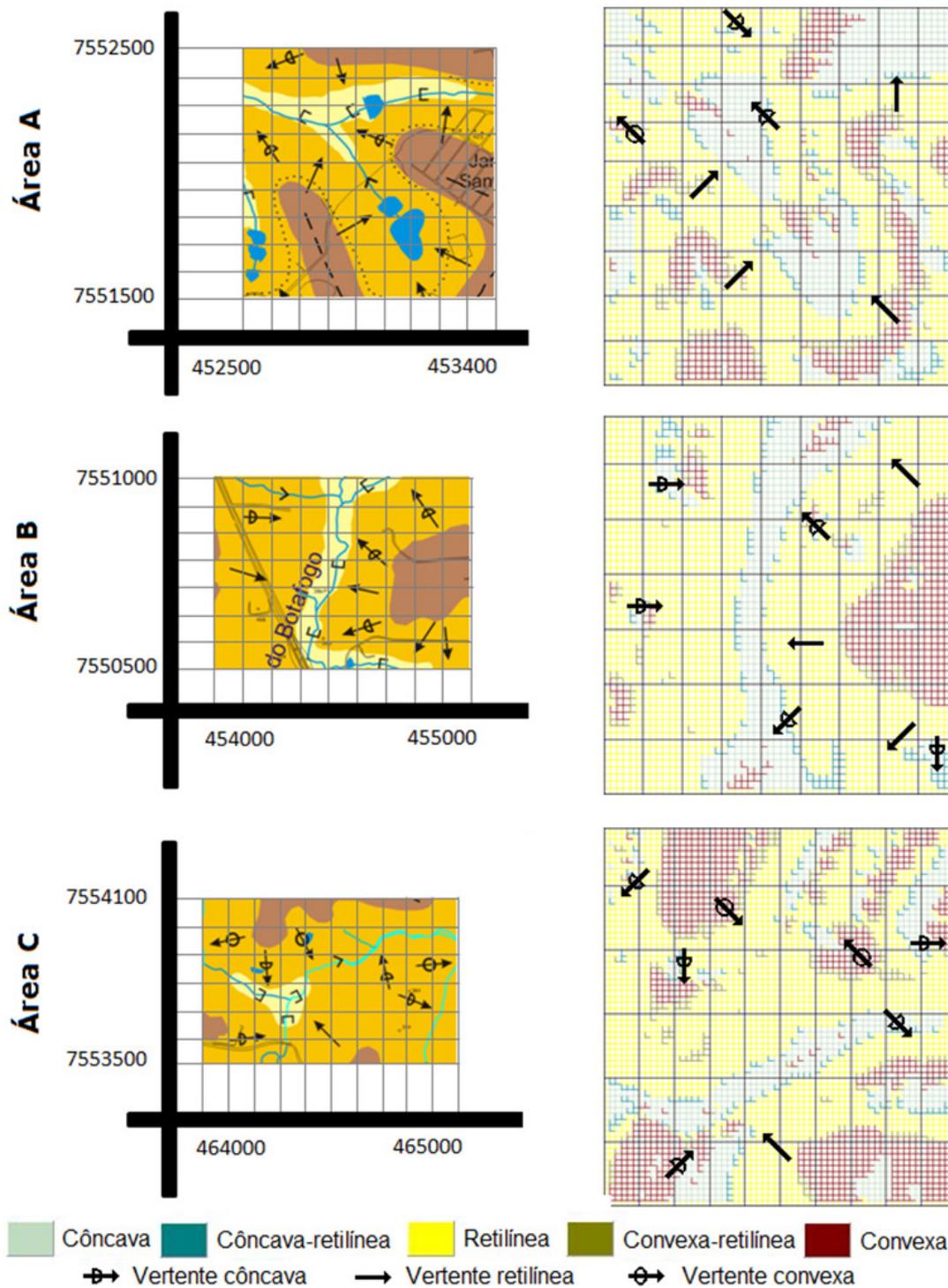


Fig. 16 – Comparação entre os mapas geomorfológicos e o MDT com interpolação TPS.

tendência, esta foi assumida, com determinada limitação de alcance e, assim, viabilizou a aplicação da krigagem ordinária.

Quanto à dependência espacial, todos os exemplos, por intermédio de seus mapas variográficos, mostraram haver correlação entre as informações de altimetria, além de uma direção com

maior continuidade espacial que juntamente pôde ser percebida pela geração dos semivariogramas, evidenciando um caráter anisotrópico.

Na validação dos testes do produto final em comparação com mapas geomorfológicos, as imprecisões representam classificações aproximadas, não corretas em sua totalidade, mas

que também não são erradas e, portanto, podem ser adicionadas às margens de acerto. Mesmo porque, as faixas difusas entre uma vertente e outra são características inerentes do relevo. Assim sendo, considerando-se as classificações corretas junto às imprecisas, a krigagem apresentou índice de 82,6%, enquanto a TPS, 69,6%. No entanto, é importante destacar que a krigagem revelou a formação de diversas áreas pequenas e heterogêneas, diferentemente da TPS que gerou áreas maiores, homogêneas e, portanto, mais definidas.

Como exemplo de aplicação, tais resultados podem ser utilizados por geomorfólogos para encontrar locais apropriados à construção de aterros sanitários, com base nas características geradas por meio da modelagem. De modo geral, em uma etapa inicial, é possível tomar conhecimento de determinada região sem haver a necessidade de se deslocar até o lugar, o que minimiza custos em tarefas operacionais.

Enfim, embora a pesquisa enfoque a curvatura da vertente, expressa nas formas divergente ou convergente, que no contexto ambiental abordado resulta em acúmulo ou escoamento de água, sua aplicação pode ser estendida a diversas áreas que tenham interesse na usabilidade do solo cuja utilização esteja associada à forma, uma vez que os resultados alcançados servem como alternativa na representação da superfície, fornecendo mais informações sobre o relevo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da FCT/UNESP onde ocorreu o desenvolvimento do trabalho e à agência de fomento CNPq, pela bolsa concedida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIOTTI, J. L. S. **Fundamentos de estatística e geoestatística**. São Leopoldo: Unisinos, 2003. 165 p.

ANJOS, D. S. **Classificação da curvatura de vertentes em perfil via thin plate splines e inferência fuzzy**. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2008.

BARBOSA, R. L.; MENEGUETTE JUNIOR, M.; SILVA, J. F. C.; GALLIS, R. B. A.; ITAME, O. Y.

Análise estatística da qualidade de um modelo digital do terreno gerado com thin plate spline. **RBC - Revista Brasileira de Cartografia**. Rio de Janeiro, v. 60, n. 2, p. 127 – 132, ago. 2008.

BENINI, L. C.; MENEGUETTE JUNIOR, M. Uma abordagem para modelagem de dados com o uso de sistemas neuro-fuzzy: aplicações geoespaciais. In: BARBELOS, C. A. Z.; ANDRADE, E. X. L.; BOAVENTURA, M. (Ed.). **XXXII CNMAC**. São Carlos: SBMAC 2009, (Notas em Matemática Aplicada, v. 43). p.88.

BOOKSTEIN, F. L. Principal Warps: Thin-Plate Splines and the Decomposition of Deformations. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v.11, n.6, p.567-85, 1989.

CAMARGO, E. C. G.; FUCKS, S. D.; CÂMARA, G. **Análise espacial de superfícies**. Brasília: Embrapa, 2004.

CASTANHO, J. E. C.; TOZZI, C. L. Obtenção da transformação de corpo rígido em registro de imagens com deformação usando thin plate spline. In: Simpósio Brasileiro de Computação Gráfica e Processamento de Imagens. **Anais**. Caxambu, 1996.

EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and applications**. Boston: Artech House, 2005. 257 p.

FELGUEIRAS, C. A. Modelagem numérica de terrenos. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. (Ed.). **Introdução à ciência da geoinformação**. São Jose dos Campos. INPE, 2001, (Ciência e Engenharia da Geoinformação). Cap. 7, p. 174-211. Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd>>. Acesso: 03 março 2011.

FLORENZANO, T. G. Introdução à geomorfologia. In: FLORENZANO, T. G. (Ed.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de textos, 2008. Cap. 1, p. 11-30.

GUERRA, A. T. **Novo dicionário geológico-geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2001. 648 p.

HENGL, T.; GRUBER, S.; SHRESTHA, D. P. **Digital terrain analysis in ILWIS**: lecture notes and user guide. Enschede: ITC, 2—3. 56 p. Disponível em <<http://www.itc.nl/library/>

[Papers 2003/misca/hengl_digital.pdf](#)>. Acesso: 03 março 2011.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989, 561 p.

LANDIM, P. M. B. **Análise estatística de dados geológicos**. 2. ed. São Paulo: Unesp, 2003. 253 p.

LI, Z; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital terrain modeling: principles and methodology**. London. CRC Press, 2005, 323 p.

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables**. Paris: École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1971, 211 p. (Les Cahiers Du

Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleu, 5).

NUNES, J. O. R.; FREIRE, R.; PEREZ, I. U. Mapeamento geomorfológico do perímetro urbano de Presidente Prudente – SP. In: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 6., 2006, Goiânia. **Anais...** Goiânia: UFG, 2006.

SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; OKA-FIORI, C. Estudo das unidades ecodinâmicas de instabilidade potencial na APA de Guaratuba: subsídios para o planejamento ambiental. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 57, p. 9-23, 2005.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. **Information and control**, v. 8, p. 338-353, 1965.