

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-9364-RPQ/736

**MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO DE MICROBACIAS
ELABORADOS COM KRIGAGEM**

Márcio de Morisson Valeriano

Do projeto de Produtividade em Pesquisa “Padronização de metodologias para
tratamento digital de microbacias”, proc. N.º 301029/00-8 (NV)

INPE
São José dos Campos
2002

FOLHA DE APROVAÇÃO

*Àquela que deu sentido à minha vida,
Silvana Silva Santos.*

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq, pela bolsa de Produtividade em Pesquisa, que deu origem a este trabalho.

Aos amigos, mais do que colegas, Jaime Nogueira Mendes Júnior e Benedito Domingues do Amaral, pela participação na concepção dos métodos de tratamento geostatístico dos dados em SIG, pelo fornecimento da literatura inspiradora e da cumplicidade nas horas lúdicas de nosso convívio universitário.

Ao Instituto Agrônomo de Campinas-IAC, cujo Laboratório de Geoprocessamento deu a motivação, a substância e o suporte a grande parte do desenvolvimento deste trabalho. Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE, que acolheu este projeto no final de sua gestação, com perspectivas de frutificação e novos rumos.

A todos os meus professores, desde os primeiros, cujos nomes precisariam de muito mais espaço para registrá-los sem cometer injustiças.

Aos meus pais, Dalton e Ana, e aos filhos Gustavo, Carlos e Rodrigo, pelo testemunho vivo dos milagres que a educação e o aprendizado podem realizar.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a krigagem como método de formação de Modelo Digital de Elevação (MDE) para estudos em microbacias. Os pontos fornecidos pelas isolinhas digitalizadas foram submetidos aos processos de amostragem, análise geoestatística e interpolação, em encadeamento não-linear. Os resultados foram avaliados quanto à elevação, diretamente, e à declividade calculada em Sistema de Informação Geográfica (SIG), em comparação com MDE gerados mediante interpolação linear e Inverso do Quadrado da Distância (IQD). Com dados de 6 microbacias de diferentes características do relevo e diferentes especificações cartográficas, os MDE krigados apresentaram boa flexibilidade, representando de modo relativamente satisfatório as variações locais das diferentes áreas, com feições harmoniosas e arredondadas bem como feições abruptas do terreno. A apreciação visual de superfícies e perfis de relevo e a análise de histogramas da declividade levaram à conclusão de que os interpoladores lineares e IQD, a despeito de sua popularidade, trazem sérias limitações ao uso dos respectivos MDE na análise quantitativa de dados topográficos para microbacias.

CONSTRUCTING DIGITAL ELEVATION MODELS FOR WATERSHEDS WITH KRIGING

ABSTRACT

This research was conducted to evaluate kriging as a method for the generation of Digital Elevation Models (DEM) for watershed studies. The points stored by the digitizing of the contour lines were submitted to sampling, geostatistical analyses and interpolation procedures, in a non-linear data flux. The evaluation of the results were concerned to the elevation itself and to the slope angles, calculated by Geographical Information System (GIS), as compared to those obtained from DEM created through linear interpolation and Inverse Squared Distance (ISD) methods. Among 6 watersheds with different relief types and cartographical data specifications, kriged DEM showed flexibility to yield relatively adequate representations of the local variations of the different areas, with round and harmonic features, as well as abrupt terrain changes. Visual observations of the surfaces and of relief profiles, and analyses of slope results histograms led to the conclusion that linear and ISD interpolators, despite their popularity, bring serious limitations to the use of the corresponding DEM for the quantitative analysis of watershed topographical data.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	13
CAPÍTULO 2 - DESENVOLVIMENTO	18
2.1 – Recursos computacionais	18
2.2 – Dados de Entrada	17
2.3 – Amostragem dos Dados.....	21
2.4 – Análises Geoestatísticas	23
2.5 – Interpolação	26
2.6 – Avaliação dos Resultados.....	28
CAPÍTULO 3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
capítulo 4 - CONCLUSÕES.....	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
APÊNDICE A - LINHAS DE COMANDO DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM.....	49
APÊNDICE B - LINHAS DE COMANDO DO PROCESSO DE INTERPOLAÇÃO POR KRIGAGEM DAS 6 MICROBACIAS SOB DUAS RESOLUÇÕES ESPACIAIS	51
APÊNDICE C - LINHAS DE COMANDO E PALETA DE CORES DO PROCESSO ADD	53

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A operação de modelos analíticos com planos de informações sobrepostos em Sistemas de Informação Geográfica (SIG) demanda a preparação de imagens digitais georeferenciadas de cada variável. Tais imagens, ou Planos de Informação (PI), constituem os chamados Modelos Digitais do Terreno (MDT), dos quais o Modelo Digital de Elevação (MDE) é um exemplo de evidente utilização. Os dados topográficos são fonte de muitas variáveis importantes e freqüentemente solicitadas nas análises ambientais aplicadas a microbacias. Embora existam MDE de várias origens, as curvas de nível constituem uma importante fonte de dados para sua construção, visto que dessa maneira numerosos trabalhos de SIG integram mapas topográficos a outros planos de informação. Essencialmente, este processo consiste na digitalização dos dados topográficos e sua posterior interpolação, quando as elevações são estimadas ponto a ponto de uma grade regular para seu armazenamento sistemático.

Há trabalhos de pesquisa específicos para avaliação do potencial de informação de superfícies geradas por diferentes interpoladores, sobretudo em condições de dados esparsos, indicando a krigagem como um método adequado nessa situação (Borga & Vizzaccaro, 1997). No entanto, os dados topográficos apresentam características particularizadas quanto à distribuição espacial das fontes e às especificações desejáveis de suas variáveis. Os estudos envolvendo dados topográficos têm se voltado à caracterização de unidades da paisagem com base em variáveis morfológicas, estreitamente ligadas a feições geométricas da superfície sob análise (Doornkamp & King, 1971; Meijerink, 1988). A disponibilidade crescente de bases topográficas digitais, aliada ao uso de SIG, impulsiona o desenvolvimento de métodos automáticos de extração dessas variáveis, para posterior tratamento e integração em ambiente computacional. Exemplos de MDE usados nesses estudos têm origens e aplicações variadas: MDE extraídos de pares estereoscópicos de imagens SPOT para classificação de vertentes (Giles & Franklin, 1998); base GTOPO30 para análise fisiográfica e geomorfométrica (Miliarensis & Argialas, 1999; Miliarensis, 2001); bases de dados fotogramétricos para avaliação de métodos (Ötsman, 1987; Li, 1992); MDE teóricos

para desenvolvimento de processos de análise (Iri et al., 2001); MDE de dados cartográficos complementados por DGPS para simulação de cenários de inundação (Blomgren, 1999); enfim, numerosos trabalhos com MDE gerados a partir de curvas de nível de mapas impressos.

Em microbacias, predomina o enfoque ao problema da erosão em seus múltiplos aspectos, como estimativas diretas (Castro & Valério Filho, 1997; Ranieri et al., 1998; Molnár & Julien, 1998) e mapeamento de fatores envolvidos (Desmet & Govers, 1996; Kinnel, 2001). Dessa linha de pesquisa, depreende-se que diferentes tipos de relevo requerem diferentes métodos de tratamento, como propõem Valeriano & Garcia (2000), que recomendam uma estratificação do tratamento de dados dentro da escala de trabalho, seja uma unidade geomorfológica, microbacia ou vertente. Nesse ponto, volta-se à questão da caracterização de unidades da paisagem pelas variáveis morfológicas. As diferentes variáveis passíveis de extração automática em SIG podem dar suporte à classificação multivariada da paisagem, fornecendo uma segmentação da mesma em ambientes topográficos (Giles & Franklin, 1998; Miliareis & Argialas, 1999).

Além da citada importância metodológica, a definição dos ambientes topográficos tem por si importante potencial no levantamento de solos, se for levado em conta que as técnicas tradicionais de fotopedologia objetivam uma compartimentação do terreno análoga. Esta perspectiva traz ao sensoriamento remoto de solos uma maior possibilidade de aplicação, visto que inferências sobre pequenas áreas de solo exposto podem assim ter sua distribuição espacial definida. Considerando a impossibilidade de exposição do solo por grandes áreas, este aspecto representa uma alternativa importante para a viabilização de técnicas de sensoriamento remoto orbital para suprir a necessidade de detalhamento do mapeamento de solos em microbacias. Estas abordagens requerem, entre outras condições, um grau de fidelidade aceitável e conhecido das variáveis derivadas do MDE, sem o qual torna-se impossível a análise comparativa entre diferentes unidades de mapeamento.

Os programas associados aos SIG possuem uma série de recursos de interpolação para a formação de imagens numéricas a partir de dados tabulares. Embora dotados de diversos algoritmos de interpolação, grande parte dos aplicativos de SIG traz de fábrica uma configuração “default” para realizar interpolações ponderando os pontos pelo Inverso do Quadrado da Distância (IQD) em relação ao local estimado (WATSON, 1994). Ao se optar por outro interpolador (linear ou krigagem, por exemplo), este também se configura automaticamente, na falta de especificações fornecidas pelo usuário. As configurações default permitem que qualquer usuário de SIG possa utilizar estes interpoladores sem que necessite tomar conhecimento do processo executado, chegando assim a seu objetivo.

Entretanto, interpolações requerem, a rigor, o conhecimento da estrutura de variabilidade espacial do conjunto de dados, sob risco de se criarem resultados indesejáveis. Os testes feitos sobre o desempenho dos interpoladores se concentraram, de modo geral, na exatidão da própria elevação, ou altitude, embora o desempenho de algoritmos de extração e mapeamento de informações derivadas se apresente sensível às especificações técnicas decorrentes do processo de obtenção dos MDE (Östman, 1987).

Os métodos de interpolação, de modo geral, envolvem uma expressão puramente matemática entre os pontos (x,y) de valor (z) conhecido para a estimativa dos valores desconhecidos em outros pontos. A krigagem, por sua vez, se baseia em modelos estatísticos da variabilidade espacial, ajustados à realidade apresentada pela amostra de pontos conhecidos. Sob premissas menos arbitrárias do que outros métodos, a krigagem conduz a estimativas estatisticamente expressivas com variância conhecida e mínima (Oliver & Webster, 1990).

O reconhecimento do padrão de dependência espacial (ou continuidade), necessário à prática da krigagem, requer a criação e a análise de semivariogramas, que descrevem a variância em função da distância entre pontos experimentais observados. A estimativa dos valores da variável nos pontos desejados (no caso, a grade regular) é feita com a ponderação das observações experimentais em função do alcance, da escala e do efeito pepita do semivariograma, calculados com análise geoestatística (BURROUGH, 1987).

O alcance representa o raio de influência dos pontos amostrados sobre sua vizinhança, indicado pela distância na qual a variância se estabiliza. O valor de interseção do semivariograma com o eixo y corresponde ao efeito pepita, que é a estimativa da variação espacialmente aleatória. A amplitude restante em y corresponde à componente espacialmente correlacionada, que será referida aqui como escala do semivariograma, de acordo com a terminologia encontrada em aplicativos de interpolação.

Apesar de reconhecerem que a interpolação linear e a krigagem devam resultar, respectivamente, nos menores e maiores níveis de exatidão de MDE (com os demais métodos resultando em exatidão intermediária), Kubik & Botman (1976) consideraram pequenas as diferenças de exatidão encontradas entre as elevações estimadas por um método ou outro. E concluem que outros critérios, como facilidade e velocidade computacional, devam nortear a escolha do método. Östman (1987), por sua vez, sugere que a qualidade dos MDE seja avaliada com base em atributos derivados, como declividade e curvatura, a exemplo do que fez Giles & Franklin (1996), que compararam resultados de declividade para testar MDE gerados pelo sensor orbital SPOT.

Este trabalho apresenta procedimentos para a formação de Modelo Digital de Elevação (MDE) de microbacias a partir de mapas de curvas de nível com krigagem. Para os exemplos aplicados neste trabalho, foram selecionadas 6 microbacias (Ribeirão Preto, rios Jacuí, Bangu e Grande Ubatuba e córregos São Joaquim e Soturninha) com diferentes características de relevo, área total e especificações cartográficas dos mapas-base.

CAPÍTULO 2

DESENVOLVIMENTO

2.1 Recursos computacionais

Este trabalho se ateve ao tratamento dos dados partindo-se dos arquivos já digitalizados, sob formato *DXF*. Os seguintes programas foram utilizados:

- *DXF2DAT.EXE* (FORTRAN): conversão de arquivos no formato *DXF* para *ASCII*;
- *MINITABTM* (Minitab Inc., 1995): análises estatísticas;
- *VarioWin* (Pannatier, 1996): análises geoestatísticas;
- *Surfer* (Golden Software Inc., 1995): interpolações; e
- *Idrisi* (Eastman, 1995): geoprocessamento.

2.2 Dados de entrada

As curvas de nível digitalizadas constituem-se de pontos conectados por linhas (Figura 2.1). Embora o formato vetor compreenda feições lineares, somente os pontos assinalados com o traçador da mesa digitalizadora registram os atributos *x*, *y* (posição) e *z* (valor da variável). Estes pontos são os dados sobre os quais recaem a análise geoestatística e a interpolação.

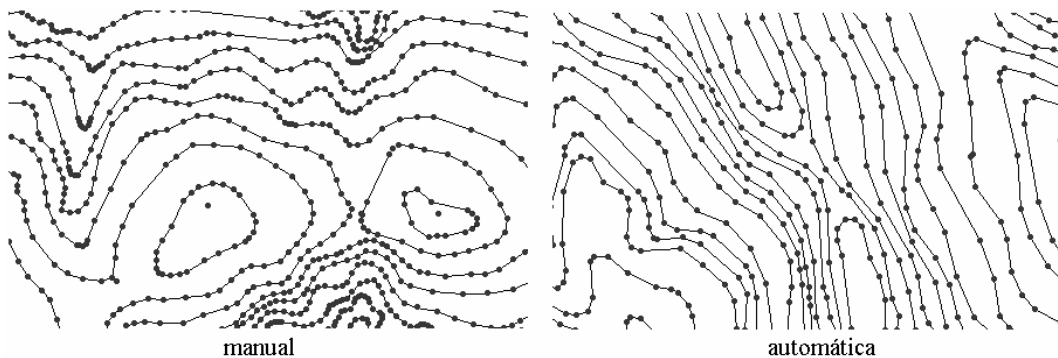


FIGURA 2.1 - Digitalização manual e automática das curvas de nível.

O número de pontos digitalizados varia de um arquivo a outro, em função da área, gradiente topográfico, sinuosidade e equidistância vertical das curvas, além da própria digitalização, conforme a densidade de pontos aplicada pelo operador na amostragem das cotas. Muitas vezes, a digitalização manual é feita adensando-se pontos à medida que o relevo apresenta mais detalhamento das curvas de nível, buscando-se economia de trabalho e otimização do espaço computacional (Figura 2.1). Técnicas automáticas de digitalização ou de tratamento de isolinhas digitalizadas manualmente também resultam num adensamento dos pontos em função da sinuosidade das curvas, porém de forma mais uniforme, segundo um padrão de generalização definido previamente pelo operador. Gao (1995) recomenda estes esquemas de amostragem, propositais, em contraposição à amostragem sistemática, em que se amostram dados em espaçamentos regulares.

Variações no modo de digitalização explicam as flutuações na proporção do tamanho dos arquivos em relação à área de cobertura e à equidistância vertical das isolinhas (Tabela 2.1). As Figuras 2.2 a 2.4 apresentam as curvas de nível das microbacias, para visualização do relevo e da densidade de isolinhas e a respectiva delimitação.

TABELA 2.1 – Especificações geométricas, relevo predominante e tamanho dos arquivos de isolinhas digitalizadas

Área/Arquivo	Área (ha)	^a Eq.v. (m)	Relevo predominante	no pts.	^b KB DXF	KB ASCII
Folha de Cunha 1:50.000	70912	25	Montanhoso	248.394	30.692	5.450
Folha de Ubatuba 1:50.000	70912	25	Montanhoso a escarpado (+ mar)	187.629	23.202	4.048
MB Ribeirão Preto	73958	20	Suave ondulado a forte ondulado	88.862	7.632	1.892
^c MB São Joaquim	^c 3114	10	Suave ondulado a ondulado	11.616	1.423	248
MB Soturninha	2003	5	Suave ondulado	11.730	1.092	251

(a) Equidistância vertical entre isolinhas; (b) tamanho de arquivo dxf quando sob o formato *AutoCAD* versão 12; (c) apenas isolinhas da MB; os demais arquivos referem-se a todo o retângulo envolvente da área indicada.

As folhas de Cunha e Ubatuba, embora tenham mesma área e cubram relevo semelhante, resultam em arquivos de tamanhos diferentes principalmente pela presença do mar nesta última, o que corresponde a uma grande área desprovida de isolinhas. A mesma comparação entre estas e a área de Ribeirão Preto mostra o efeito do gradiente

topográfico médio, muito maior nas regiões montanhosas do litoral, correspondendo a uma densidade muito maior de isolinhas. Da Folha de Cunha, foram preparados os dados das microbacias dos rios Jacuí e Bangu, ambas localizadas sobre a Serra do Mar e com relação de vizinhança. A microbacia do rio Jacuí tem como limite na porção sudeste trecho do topo da escarpa que separa a Serra do Mar da Planície Litorânea.

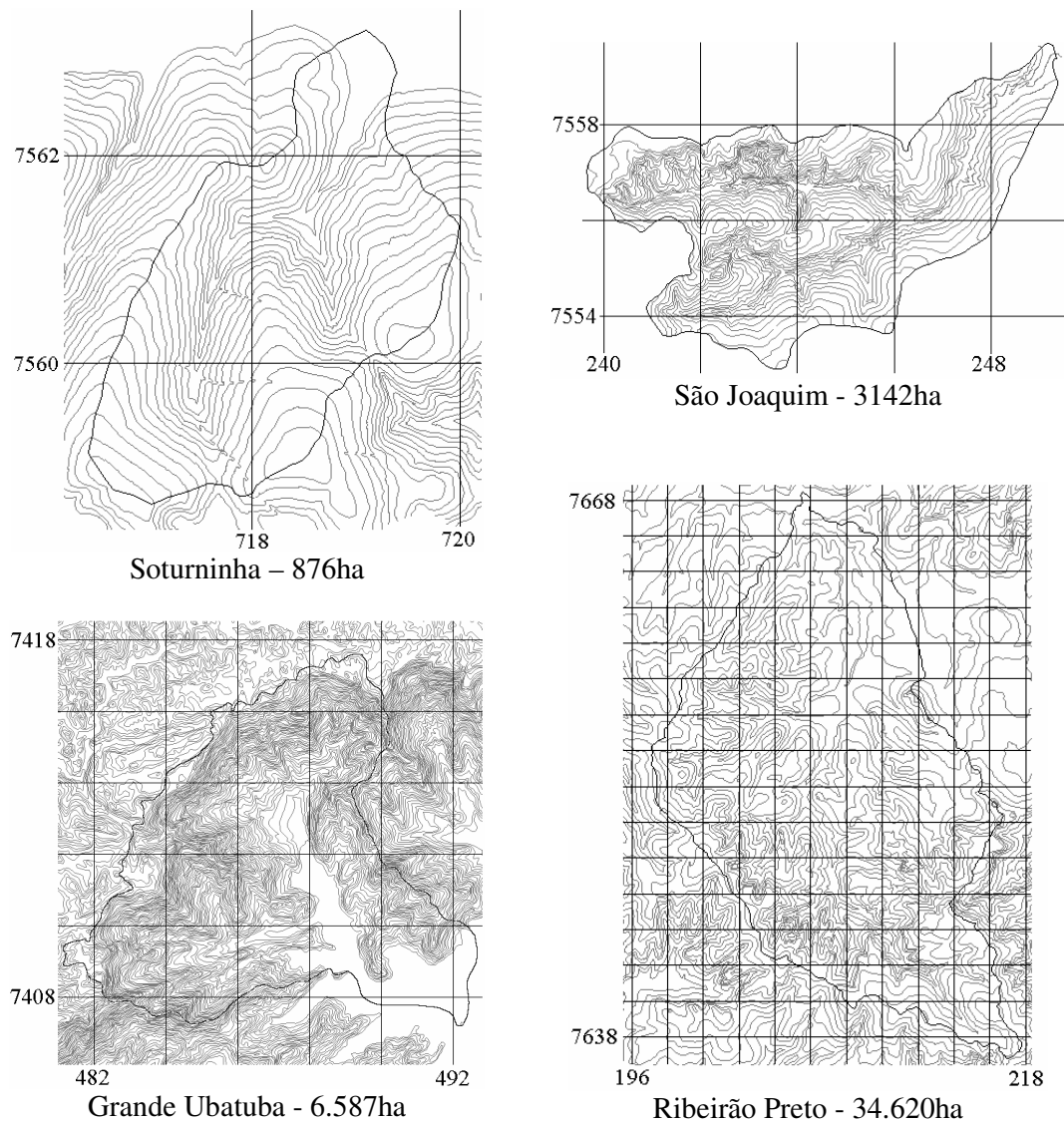


FIGURA 2.2 – Curvas de nível das microbacias do córrego Soturninha, córrego São Joaquim, rio Grande Ubatuba e Ribeirão Preto. Coordenadas em 1.000mE (x) e 1.000mN (y), com malha de 2.000m.

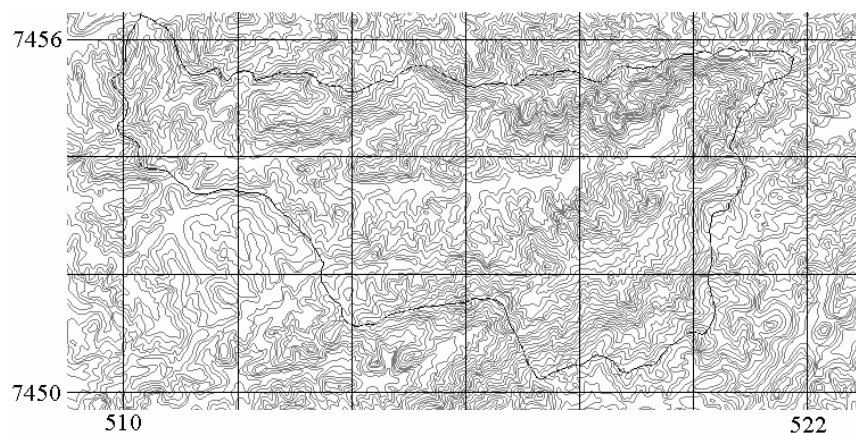


FIGURA 2.3 – Curvas de nível da microbacia do rio Bangu - 4.006ha. Coordenadas em 1.000mE (x) e 1.000mN (y), com malha de 2.000m.

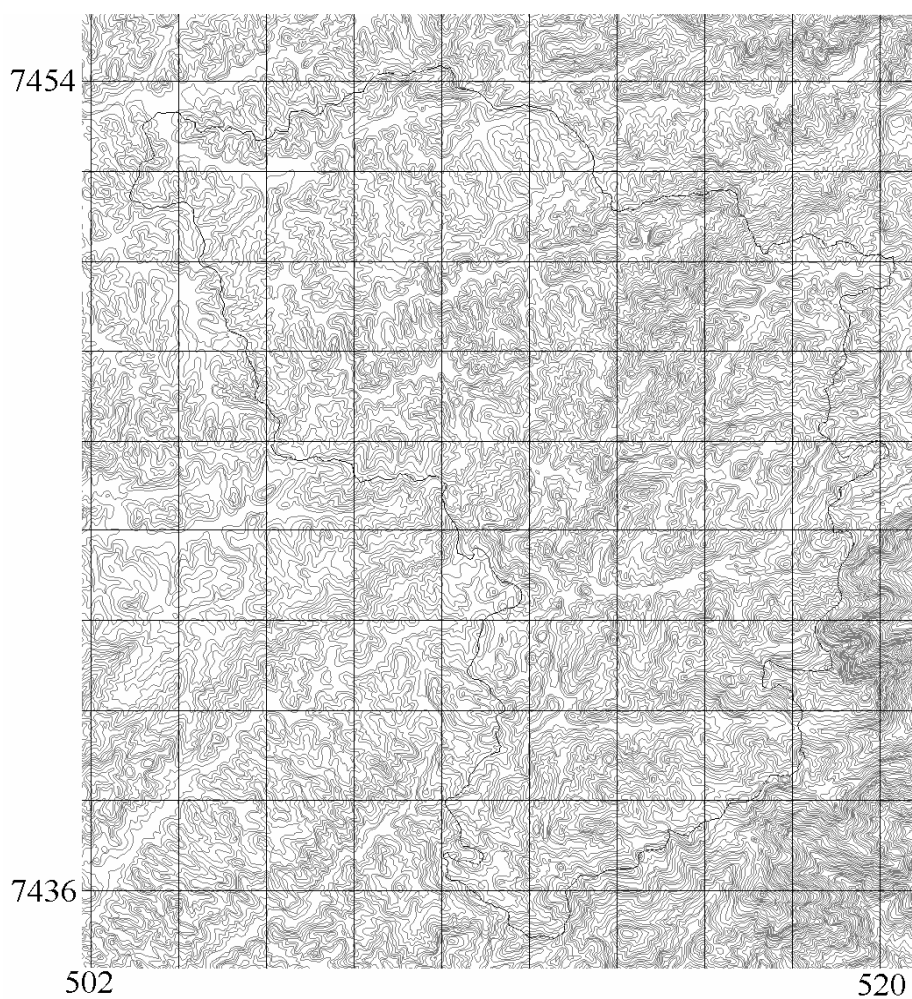


FIGURA 2.4 – Curvas de nível da microbacia rio Jacuí -17.111ha. Coordenadas em 1.000mE (x) e 1.000mN (y), com malha de 2.000m.

De qualquer modo, o número de pontos digitalizados será sempre alto, o que demandará um trabalho de amostragem antes de aplicar análises estatísticas e geoestatísticas. Geralmente, estes programas de análise apresentam limitação do número de registros muito aquém daqueles fornecidos pela digitalização de isolinhas. Os programas comerciais de tratamento geoestatístico (*GeoEAS* e *VarioWin*), por exemplo, admitem um máximo de 1.000 pontos. A amostragem torna-se, desse modo, o primeiro processo aplicado sobre os dados digitalizados, para viabilizar as análises que darão suporte à sua espacialização.

2.3 Amostragem dos dados

O processo de amostragem desenvolvido, baseado em funções de SIG, consiste nas seguintes etapas: importação do arquivo de pontos (cotas); formação de uma base geográfica (imagem vazia) correspondente; transferência das cotas à base geográfica; criação de uma imagem de amostragem espacialmente aleatória; sobreposição das imagens; e conversão/exportação das cotas amostradas. Estes passos foram programados em linguagem de macro (Figura 2.5), para que possam ser repetidos com facilidade em qualquer área de interesse, bem como testes sob outras especificações. Para executar o programa, são necessários os arquivos das cotas altimétricas em colunas x,y,z (*ASCII*) e uma imagem vazia, com correspondência geográfica com a área de interesse.

Na perspectiva de submeter os dados amostrais para análise geoestatística, há duas opções para controle da seleção dos pontos analisados: análise de pontos pertencentes a todo o retângulo envolvente e análise dos pontos pertencentes estritamente à microbacia ou área de interesse. Os testes que se seguem foram feitos para verificar as diferenças entre estas duas condições nos resultados da análise geoestatística. Em geral, é esperado que o relevo das microbacias se assemelhe àquele do retângulo envolvente. Porém, há casos em que a área se localiza adjacente a uma transição, como a microbacia do rio Grande Ubatuba, em escarpa, cercada pelo planalto Orogênico do Atlântico e a Planície Costeira. Além dessas condições, quanto maior o detalhamento da escala de observação,

e menor a microbacia, é mais verossímil que esta apresente orientação, formato e dimensões particularizados, distintos da média de sua vizinhança.

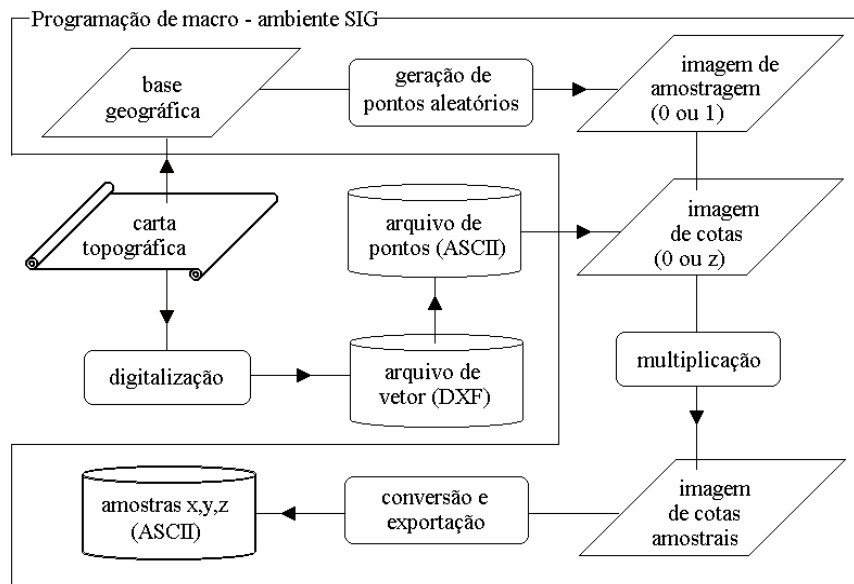


FIGURA 2.5 - Processo de amostragem dos dados topográficos: encadeamento da funções de SIG e etapas manuais prévias.

O programa de amostragem (Figura 2.5) é composto das 100 linhas de comando, apresentadas no Apêndice A. Para o leitor interessado em aplicar os tratamentos descritos, os programas de macro apresentados podem ser digitados manualmente, ou via “scanners”, e depois arquivados em formato *ASCII* com a extensão apropriada (.iml, no caso do *Idrisi*) no diretório de trabalho. Requer ainda a imagem vazia sob o nome *BASE_NNN*, uma imagem booleana *BOOL_NNN* e o arquivo formato *ASCII XYZ_NNN.dat* correspondente, onde *NNN* é um sufixo designativo da área de estudo. Caso não se queira limitar a amostragem pela imagem booleana, na ausência desta o programa se interrompe depois de armazenar as amostragens totais.

Os 10 arquivos resultantes do programa apresentado no Apêndice A apresentam-se sob os nomes *AT1_NNN* a *AT5_NNN* e *AB1_NNN* a *AB5_NNN*, os primeiros contendo amostras totais e os últimos contendo amostras de dentro das booleanas. O índice numérico 1 a 5 refere-se ao tamanho do arquivo, em ordem crescente de número de

pontos, para a escolha de um que apresente as dimensões adequadas. Geralmente, no formato de saída (*ASCII*), com coordenadas em metros UTM, uma amostragem de 1.000 pontos corresponde a um arquivo de pouco menos do que 35KB.

Observando a distribuição espacial dos dados amostrados por este processo, verificou-se que os pontos selecionados para análise mantiveram-se relativamente concentrados nas áreas de relevo mais íngreme, devido ao maior número inicial de pontos digitalizados nessa condição. Embora o fluxo de análise necessário para a formação do MDE tenha sido assim atendido, a distribuição irregular de pontos entre as diferentes condições de variabilidade espacial acarreta desvios do modelo teórico de semivariograma ajustado em relação à verdadeira estrutura de variabilidade de cada área (Isaaks & Srivastava, 1989).

2.4 Análises geoestatísticas

De posse das amostras, as análises a elas aplicadas constituem-se, em essência, da análise de tendência e da análise geoestatística propriamente dita, ou estudo do semivariograma. A remoção da tendência dos dados é necessária para atender à premissa da geoestatística de estacionaridade, que requer que as características estatísticas sejam constantes por toda a área analisada. A análise de tendência é uma regressão de z em relação a x e y . A equação define um plano médio que percorre a superfície do terreno com os menores desvios, o que corresponde à variação da média local, indicando portanto a não-estacionaridade.

As análises de tendência foram aplicadas após o deslocamento das coordenadas para atribuir $x=0$ e $y=0$ no canto SW do retângulo envolvente. Isto é feito em função da grande magnitude das coordenadas quando sob referenciamento UTM, o que resulta em x ou y estatisticamente constantes. Fazendo-se $x'_i = x_i - x_{\min}$ e $y'_i = y_i - y_{\min}$, a tendência pode ser calculada com y' e x' , o que resultou nas equações de regressão da Tabela 2.2.

Todos os coeficientes angulares, constantes e regressões foram altamente significativos (mais do que 1%), portanto a superfície de tendência não pode ser considerada horizontal (isto é, não pode ser desprezada) para nenhum caso. O alto grau de correlação

(R^2) indicou que a tendência controla boa parte da variação dos dados, ficando o restante da variância das cotas para os desvios locais. Algumas diferenças foram observadas entre os termos das equações quando calculadas sobre todo o retângulo ou somente sobre a área da microbacia. Notadamente, a inversão do coeficiente angular de x' no córrego Soturninha e para o Ribeirão Preto explicam-se pela situação particularizada das microbacias em relação à sua vizinhança.

TABELA 2.2 – Equações de tendência encontradas para as áreas de estudo usando amostras de todo o retângulo envolvente e amostras da microbacia somente

Área	Todo o retângulo envolvente				Microbacia somente			
	¹ cte. (m)	² c.ang. x'	c. ang. y'	R^2	cte. (m)	c.ang. x'	c. ang. y'	R^2
córrego Soturninha	508	-0,00669	-0,01800	0,655	501	+0,00303	-0,0255	0,741
córrego São Joaquim	759	-0,02120	+0,00494	0,731	759	-0,0212	+0,00494	0,731
rio Bangu	899	+0,04030	-0,00870	0,666	913	+0,0443	-0,0183	0,607
rio Grande Ubatuba	401	-0,00552	+0,0607	0,644	577	-0,0741	+0,0606	0,511
rio Jacuí	1121	+0,0189	-0,0128	0,342	1020	+0,0437	+0,0219	0,835
Ribeirão Preto	694	+0,00166	-0,00600	0,514	744	-0,00163	-0,00812	0,513

(1) cte.: constante ou coeficiente linear; (2) c.ang.: coeficiente angular.

Os resíduos são obtidos como a subtração entre os dados altimétricos originais e suas correspondentes altitudes calculadas em função de x e y pela equação de tendência. Como regra, os semivariogramas experimentais dos dados brutos de altimetria não atingiram um patamar estável dentro das distâncias abrangidas em cada área (Figura 2.6). A remoção da tendência fez com que o semivariograma dos resíduos atingisse uma variância máxima, coerente com os modelos teóricos de variabilidade espacial com patamar.

Em geral, é esperado que o relevo das microbacias se assemelhe àquele do retângulo envolvente. Porém, os semivariogramas mostraram que as diferenças entre modelos obtidos com a totalidade do retângulo envolvente e com dados restritos à microbacia podem ser importantes, nos casos em que a área se localiza adjacente a uma transição,

como as microbacias da Serra do Mar (Grande Ubatuba, Jacuí e Bangu), em escarpa, cercada pelo planalto Orogênico do Atlântico e a Planície Costeira. Deste exame pode-se dizer também que o semivariograma do retângulo apresenta alcance maior do que a microbacia correspondente, assim como áreas maiores apresentam alcances maiores. Este comportamento descredencia o semivariograma como caracterização da variabilidade de um atributo sob determinada condição, uma vez que os resultados geoestatísticos foram específicos de cada conjunto particular de dados e não da variável ou mesmo da área. Outra consequência é que a análise de sub-áreas de grandes microbacias resultam em modelos diferentes daquele obtido para a área toda, podendo-se estratificar a preparação de MDE em sub-áreas.

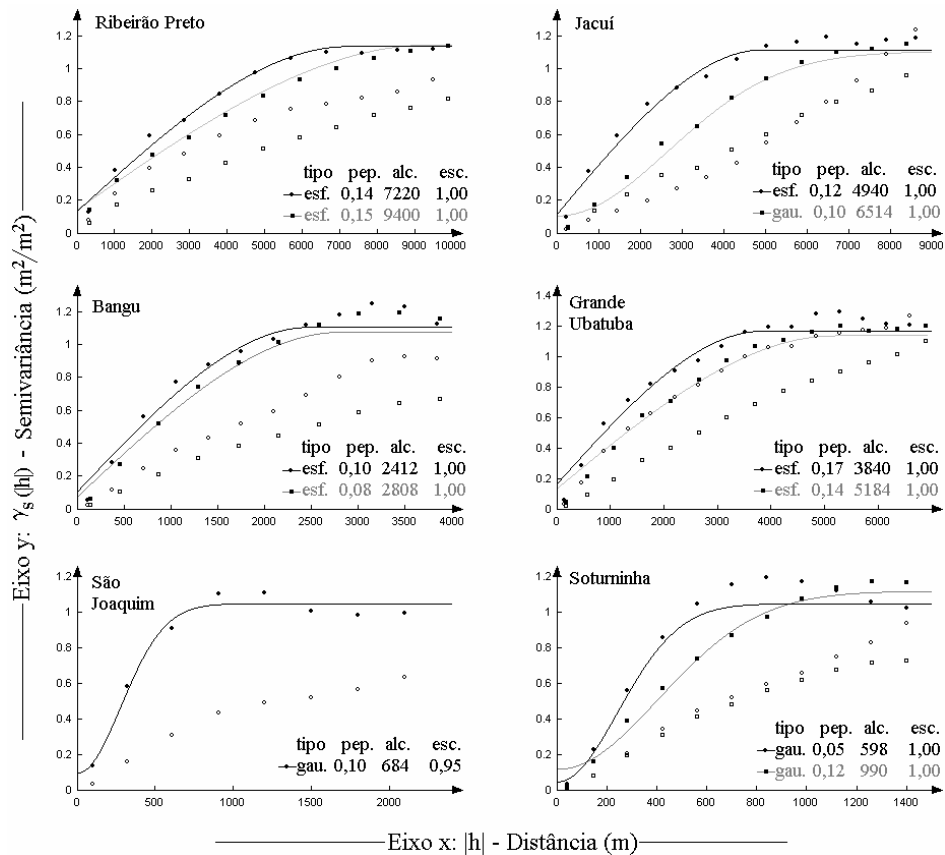


FIGURA 2.6 – Semivariogramas da topografia em diferentes microbacias, usando dados do retângulo envolvente (■, □, traço cinza) e somente da microbacia (●, ◐, traço negro) da altimetria (□ e ◐) e dos resíduos da tendência (■ e ●).

Os semivariogramas gaussianos nas áreas das microbacias do Soturninha e do São Joaquim sugerem uma possível relação entre o tipo de modelo e o relevo da área estudada. Este tipo de modelo está relacionado a variáveis que apresentam variações suaves, sem variações abruptas (Burrough, 1986), o que pode ser corroborado pelo tipo de relevo destas duas áreas. Deve-se ressaltar, no entanto, que o detalhamento da carta topográfica digitalizada também influi neste efeito, à medida que escalas mais generalizadas e isolinhas em intervalos maiores reduzem a perceptibilidade de feições detalhadas, tornando a descrição da superfície de forma mais regionalizada (Kubik & Botman, 1976).

2.5 Interpolação

A interpolação por krigagem é aplicada sobre os arquivos de cotas totais, fornecendo-se os dados de semivariograma: tipo de modelo, efeito pepita, alcance e escala do modelo teórico de variabilidade espacial. O termo escala aqui se refere à altura (em semivariância) da estrutura de variabilidade, ou seja, o patamar menos a pepita. Além desses dados, a interpolação requer que o usuário informe os dados geométricos da imagem a ser formada. Tais dados das microbacias em estudo estão apresentados na Tabela 2.3.

TABELA 2.3 – Especificações de georreferência e geometria das imagens formadas (.grd) por interpolação dos dados topográficos

Área	Zona UTM	x_{\min} (mE)	y_{\min} (mN)	x_{\max} (mE)	y_{\max} (mN)	Resolução espacial (m)	n°col.	n°lin.	Nome do arquivo (.grd)
Soturninha	23	716200	7558390	720190	7563380	10	400	500	str10
				720180	7563370	20	200	250	str20
São Joaquim	22	239550	7552800	249740	7559790	10	1020	700	sjq10
				249730	7559780	20	510	350	sjq20
Bangu	22	509000	7449700	522980	7456680	20	700	350	bng20
				522980	7456660	30	467	233	bng30
Grande Ubatuba	22	480800	7404800	492780	7418780	20	600	700	btb20
				492770	7418780	30	400	467	btb30
Jacuí	22	501800	7434240	520980	7456220	20	960	1100	jci20
				520970	7456230	30	640	734	jci30
Ribeirão Preto	22	195500	7636370	218280	7668750	20	1140	1620	rbr20
				218270	7668740	30	760	1080	rbr30

Um programa de lote, associado ao aplicativo *Surfer*, foi elaborado para controlar as interpolações, repetidamente, em duas resoluções espaciais diferentes para cada área. O uso de programação para realizar as interpolações torna-se conveniente devido ao tempo computacional demandado para as mesmas, além de oferecer um maior controle das operações, detecção de erros, testes e repetições. O programa requer um arquivo de dados na estrutura em colunas x,y,z (XYZ_NNN.dat), e é acionado mediante o módulo *GS Scriptor* do programa *Surfer*. Cada interpolação programada numa área NNN corresponde aos comandos da segunda linha em diante, que especifica o arquivo de entrada, a geometria da grade a ser interpolada (dados na Tabela 2.3) e as variáveis do modelo de variabilidade (dados na Figura 2.6), armazenados em formato *ASCII* e com extensão *.bas*:

```
SET srf=CreateObject("Surfer.App")
srf.GridData ("XYZ_NNN.dat",xcol=0,ycol=1,zcol=2,xmin=501800,\
xmax=520970,ymin=7434240,ymax=7456230,xsize=30,ysize=30,nrow=734,ncol=640,\
GridMethod=1,OutGrid="NNN30.grd",outfmt=2,searchmethod=1,searchrad=10000,\
Dupmethod=1,variantype=7,varioscale=1,variolenh=4940,errorvariance=0.12)
```

No Apêndice B estão apresentadas as linhas de comando estruturadas para a krigagem das 6 microbacias em estudo, cada uma sob duas resoluções espaciais. Para os testes comparativos, a substituição do método de amostragem pelo interpolador linear e IQD foi feita de modo eficaz usando-se a função de menu “substituir” (de *GridMethod=1* para *Gridmethod=n*, onde n é o método de interpolação) de editores de texto. Os arquivos de grade formados (*.grd*), ou imagens, são passíveis de importação pelo *Idrisi*, onde podem ser manipulados com os recursos de análise espacial do SIG. O formato de saída programado (*outfmt=2*) é *ASCII*, que permite a migração entre diferentes aplicativos, apesar do tamanho do arquivo, maior do que o formato binário. De qualquer modo, estas conversões de formato podem ser feitas internamente nos respectivos aplicativos de tratamento.

A Figura 2.7 resume todo o tratamento dos dados, da carta topográfica até o MDE, necessário à sua preparação com krigagem. Em essência, seis processos são aplicados, dos quais a digitalização, a análise de tendência e a análise geoestatística são

considerados exigentes em tempo e habilidade, ou conhecimento, do operador. Os demais são processos automáticos (ou automatizados, como a amostragem) e não requerem mais do que tempo computacional, após a especificação dos dados e dos parâmetros de entrada.

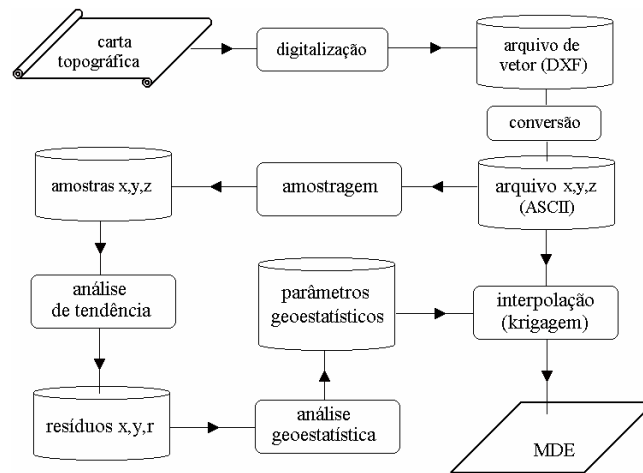


FIGURA 2.7 – Encadeamento dos processos para a preparação do MDE por krigagem a partir da carta topográfica.

Os arquivos formados a partir da amostragem podem ser dispensados após as análises, permanecendo necessários até a interpolação somente aquele das cotas totais em *ASCII*, além do registro dos parâmetros geoestatísticos alcance, escala, pepita e tipo de modelo de semivariograma. Devido ao custo de trabalho e às possíveis utilizações em SIG (sobreposições, visualização), o arquivo de vetor, produto direto da digitalização, deve ser guardado com o máximo de cuidado.

2.6 Avaliação dos resultados

Para comparações, testaram-se, além da krigagem, modelos gerados por interpolação linear e por IQD, todos operados com uso do programa *Surfer*. Os modelos digitais de elevação formados foram submetidos a dois processos de análise, elaborados para realçar de maneira distinta as características horizontais e verticais do relevo

representado. O primeiro processo se baseia na orientação de vertentes e o segundo na sua declividade.

No primeiro caso, as imagens interpoladas foram submetidas a uma função de análise de SIG conhecida como aspecto, para geração de um modelo de orientação de vertentes, (em 16 classes de azimute) e a um processamento para evidenciação de canais de drenagem e divisores de água (Valeriano e Moraes, 2001), sobrepostos em um único produto. As linhas de comando programadas no arquivo de macro do *Idrisi*, ADD.iml (Azimute+Drenagem+Divisores), estão apresentadas no Apêndice C.

Para fornecer a sensação de relevo nas imagens produzidas por este processo, o produto requer a apresentação sob uma paleta com brilho progressivo a partir das faces orientadas para o sul (classe de azimute 8) até as faces orientadas para o norte (classes de azimute 1 e 16). Aos quadrantes a leste foi adicionada uma matiz vermelha e a oeste azul, distinguindo-se assim vertentes recíprocas de mesmo brilho. As áreas planas, os canais de drenagem e os divisores de água recaem sobre as classes 0, 17 e 18, respectivamente representadas por cinza, azul e ocre (Figura 2.8). O Apêndice C contém as especificações da distribuição de intensidade para os canais RGB na elaboração da paleta para visualização ADD.

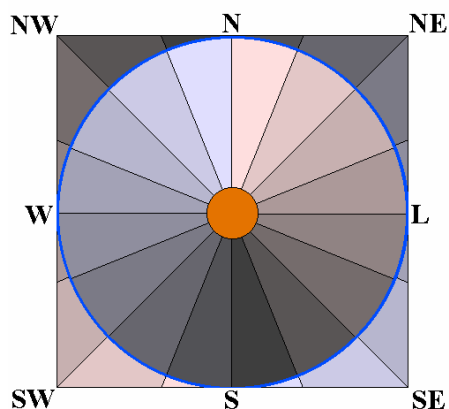


FIGURA 2.8 – Legenda circular das classes de azimute para orientação de vertentes, drenagem e divisores de água para visualização ADD.

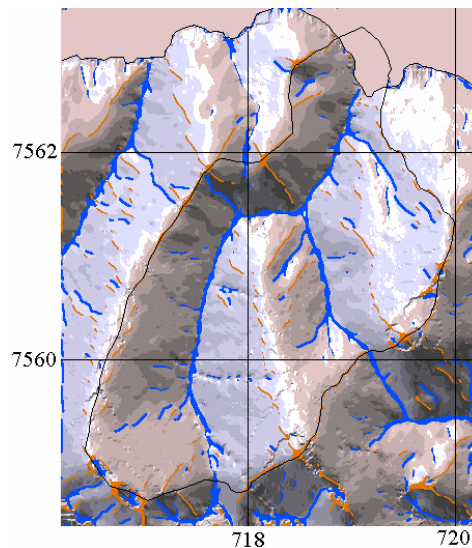
A outra forma de verificação adotada engloba a observação de histogramas e perfis de vertentes seleccionadas, tomando-se dados da própria altitude bem como os correspondentes resultados do cálculo de declividade.

CAPÍTULO 3

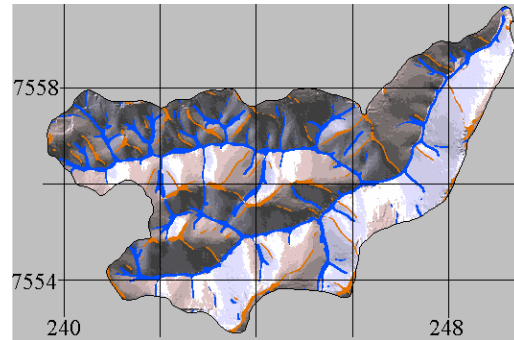
RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 3.1 a 3.3 apresentam as superfícies krigadas de acordo com o processo de visualização mencionado anteriormente. A técnica fornece uma representação do relevo que favorece de modo notável a percepção visual da estrutura da hidrologia superficial e fluvial, uma vez que elimina as variações de sombreamento causadas pela configuração em perfil. As bruscas mudanças de orientação representadas pelos canais de drenagem e divisores de água são evidenciados, bem como pequenas rugosidades, naturais ou não, da superfície dos MDE.

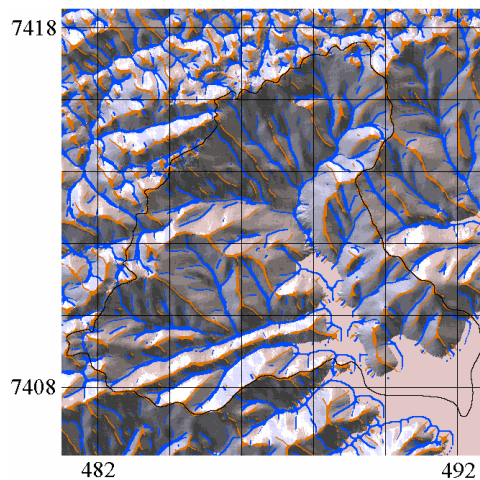
Os modelos gerados apresentam formas coerentes com as variações locais dos diferentes tipos de relevo, apresentando feições harmoniosas, arredondadas, assim como feições abruptas do terreno. Observando-os em detalhe ampliado, verifica-se a presença de pequenas feições de drenagem, desconexas, caracterizando pequenos canais que correspondem a trechos da rede de drenagem evidenciados na topografia, em alguns casos, e eventuais artefatos existentes nos MDE ou criados pelo próprio processo ADD, em outros.



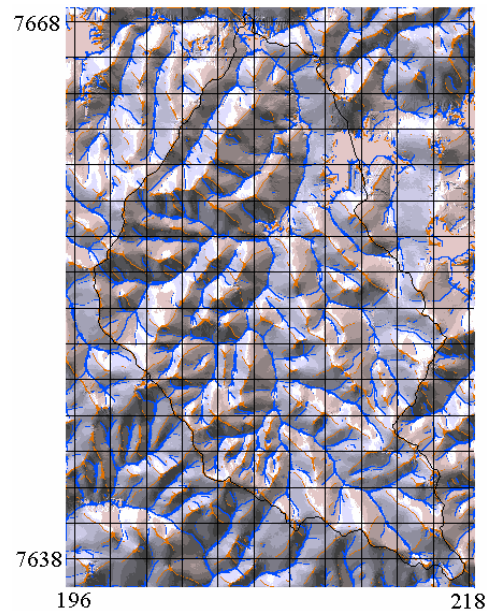
Soturninha – 876ha



São Joaquim - 3142ha



Grande Ubatuba - 6.587ha



Ribeirão Preto - 34.620ha

FIGURA 3.1 – Superfícies topográficas das microbacias do córrego Soturninha, córrego São Joaquim, rio Grande Ubatuba e Ribeirão Preto. Coordenadas em 1.000mE (x) e 1.000mN (y), com malha de 2.000m.

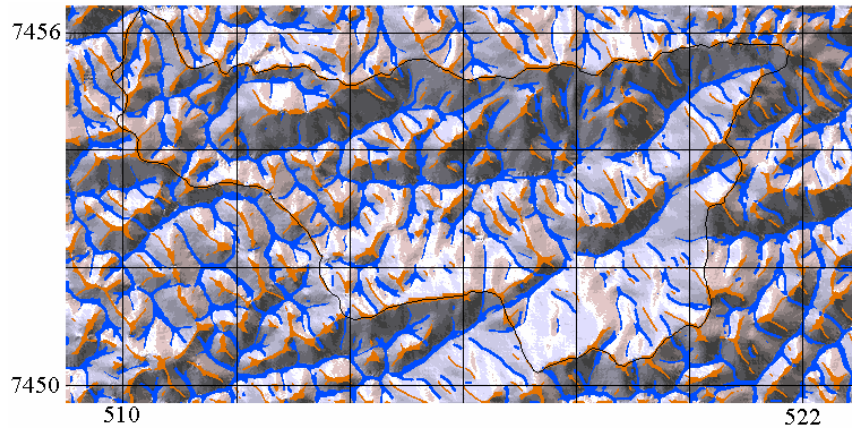


FIGURA 3.2 – Superfície topográfica da microbacia do rio Bangu - 4.006ha. Coordenadas em 1.000mE (x) e 1.000mN (y), com malha de 2.000m.

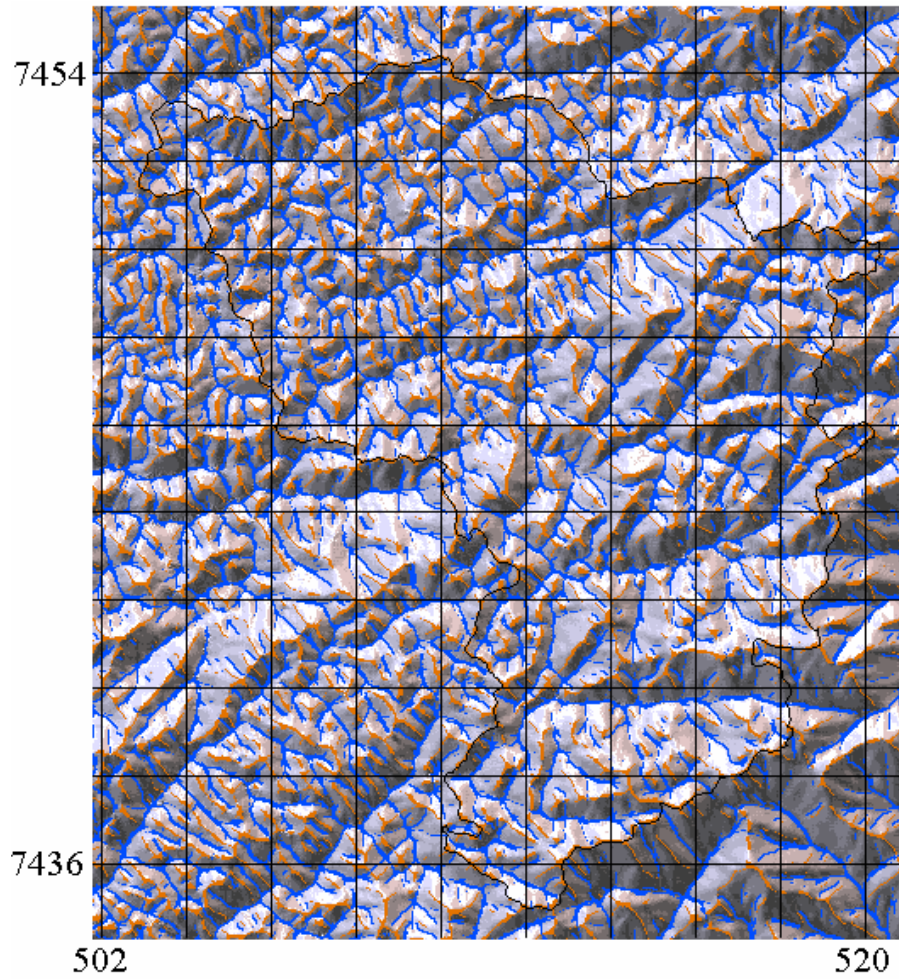


FIGURA 3.3 – Superfície topográfica da microbacia rio Jacuí -17.111ha. Coordenadas em 1.000mE (x) e 1.000mN (y), com malha de 2.000m.

A variabilidade espacial em pequena escala, correspondente a feições de relevo detalhadas e eventuais erros de amostragem, pode ser parcialmente controlada ao se inserir a componente aleatória dada pelo efeito pepita (do semivariograma) no processo de krigagem. Com a suposição de que os dados topográficos coletados de curvas de nível estejam isentos de erros, tal estratégia pode não parecer recomendável, uma vez que eliminaria feições detalhadas, reduzindo assim o potencial de informação do MDE. No entanto, com a progressiva supressão da aleatoriedade (superfícies e perfis da Figura 3.4), observam-se artefatos crescentes nas áreas de menor densidade dos pontos amostrais que compõem as curvas, corroborando as observações de Li (1992). Em concordância com os cálculos do comportamento da variância de estimativa, relatado por Kubik & Botman (1976), tais artefatos foram mais pronunciados em torno do ponto intermediário entre curvas.

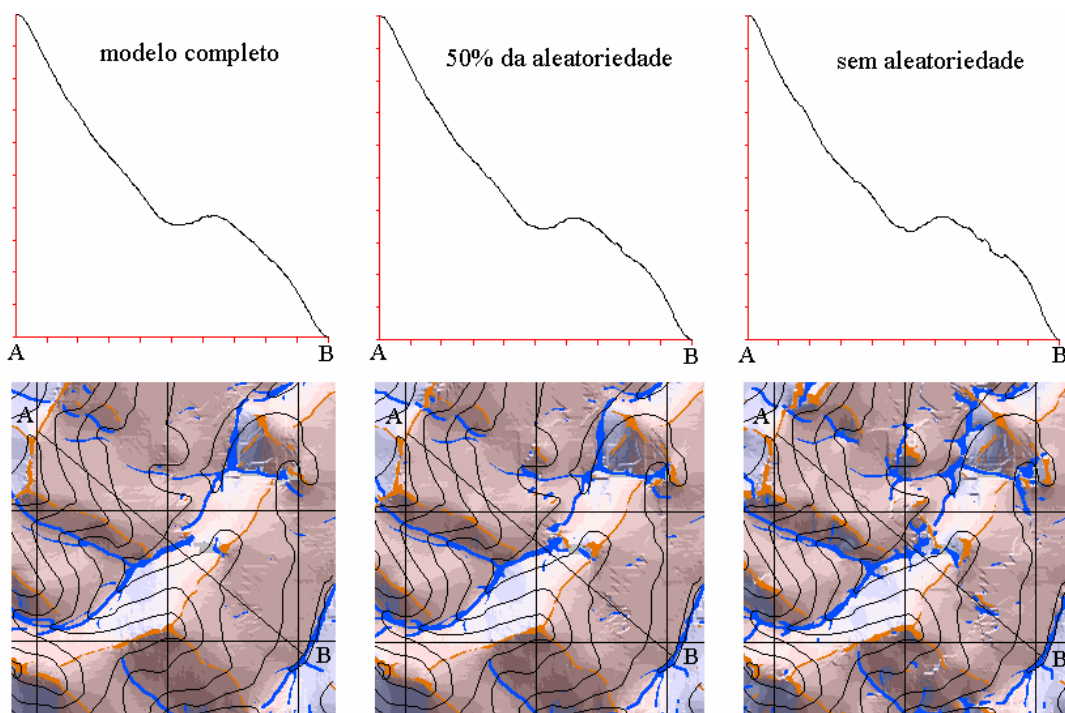


FIGURA 3.4 – Acentuação dos artefatos devido à supressão progressiva da aleatoriedade.

Espera-se que as flutuações devidas à incorporação da aleatoriedade tenham como efeito indesejável a atenuação de verdadeiros pontos de máxima e mínima local. A

distribuição da variância do efeito pepita é feita indistintamente, em função exclusiva do desvio de cada ponto amostral em relação aos pontos localizados na vizinhança. A krigagem é considerada um interpolador inexato quando incorporado o efeito pepita (Özdamar et al., 1999), isto é, a superfície pode flutuar em torno dos valores observados de z . Naturalmente, os divisores de água e os canais de drenagem têm suas elevações diminuídas e aumentadas, respectivamente. Na Figura 3.5 está apresentado o perfil de um transecto da área de Ubatuba, onde se verificou o maior nível de efeito pepita. Este detalhe representa o caso de maior desvio (16m) entre todos os casos, observado na área que engloba a escarpa da Serra do Mar. Todos as outras áreas apresentaram desvios menores e, sob exame comparativo, os desvios máximos corresponderam a um valor em torno da metade da equidistância vertical das curvas de nível. Uma variável topográfica de interesse, diretamente afetada por estes desvios é a chamada altura do relevo, ou amplitude (Meijerink, 1988), cuja redução deverá corresponder à soma dos desvios nos canais de drenagem e nos divisores de água.

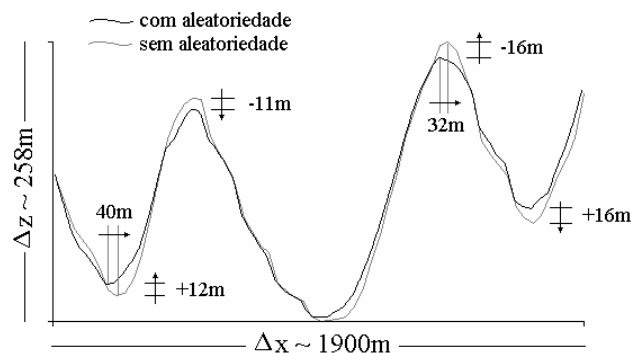


FIGURA 3.5 – Deslocamentos verticais e horizontais devidos à inclusão da aleatoriedade num transecto na área de Ubatuba.

Outro efeito da incorporação da aleatoriedade foi o deslocamento horizontal de alguns divisores de água e canais de drenagem (Figura 3.5). Os desvios corresponderam a algo entre 1 e 2 pixels do MDE, ou menos do que 1mm na escala de mapeamento. Embora menos triviais do que os deslocamentos verticais, tais deslocamentos são explicáveis, dada uma distribuição assimétrica do primeiro efeito em torno dessas feições. Além da assimetria na distribuição de curvas em vertentes recíprocas, deve-se considerar a curvatura horizontal como outro fator de possível influência nestes casos.

Os deslocamentos verticais e, sobretudo os horizontais, relatados acima foram desprezíveis nas áreas de menor efeito pepita. Em todo caso, o efeito pepita calculado mediante o fluxo de amostragem proposto (Figura 1.5) estará sempre superestimado em relação a uma amostragem ideal, quando inexitem áreas de concentração dos pontos amostrais. Na intersecção da malha amostral aleatória sobre a malha de pontos digitalizados pelo esquema objetivo (Gao, 1995), o resultado mantém uma ligeira aglomeração de pontos nas vertentes de maior declividade, devido à concentração de curvas de nível. O maior número de pontos sob esta condição não representa, proporcionalmente, a variabilidade espacial de todo o relevo analisado. Para contornar este problema, Blomgren (1999) removeu parcialmente os pontos aglomerados, o que reduziu o efeito pepita e a variância do semivariograma, além de promover melhor ajuste entre os semivariogramas experimental e teórico. Caso a finalidade do MDE torne imprescindível melhorar este aspecto (como no estudo citado), para manter a operacionalidade do processo, tal procedimento deverá, adiante, ser incorporado ao respectivo programa de macro, num desenvolvimento futuro. Para as principais variáveis utilizadas nas análises de hidrologia e conservação do solo de microbacias, estes efeitos são relativamente inócuos. Permanecem, para as áreas de relevo muito acidentado, pequenas limitações para a análise da altura (amplitude) do relevo e das formas dos canais de drenagem, além de uma leve imprecisão na estimativa de área de sub-bacias.

Para comparar os MDE elaborados por krigagem com aqueles obtidos por interpolação linear e IQD, pode-se aplicar a visualização pelo processo ADD, como foi feito para observar a ação da aleatoriedade. Dada a pequena magnitude encontrada do efeito pepita (Figura 1.6), pode-se dizer que as superfícies testadas têm as mesmas cotas altimétricas nos pontos que compõem as curvas de nível. As diferenças entre os interpoladores se manifestam, portanto, no espaço entre as curvas de nível (Figura 3.6). Sob o processo ADD, estas diferenças se expressam no aspecto visual do relevo representado, em que a aparência relativamente natural das superfícies krigadas contrasta com aquelas obtidas pelos dois outros métodos.

Na superfície produzida pelo interpolador linear destacam-se o aspecto facetado das vertentes, as estruturas de drenagem retilíneas e a fragmentação dos divisores de água igualmente retilíneos. O perfil apresentado contém ainda uma extensão plana, relativo à porção interna de uma curva isolada, o que deve ocorrer com frequência em torno dos divisores de água localizados entre vertentes íngremes. Comparando as diferentes microbacias sob o processo ADD, observou-se que os aspectos indesejáveis do interpolador linear são mais pronunciados quanto mais detalhada for a escala e mais suave for o relevo. O IQD, por sua vez, gerou uma superfície com um grande número de artefatos, concentrados em torno das curvas de nível, sinuosidade excessiva nas feições de drenagem, além de falsas estruturas de drenagem, inclusive lagos. Se, por um lado, facetas triangulares são uma decorrência direta (e inevitável) da interpolação linear, por outro, os numerosos artefatos produzidos pelo IQD podem ser explicados pela inadequada distribuição dos pontos amostrais, condicionados às curvas topográficas, diante da expressão matemática desse interpolador.

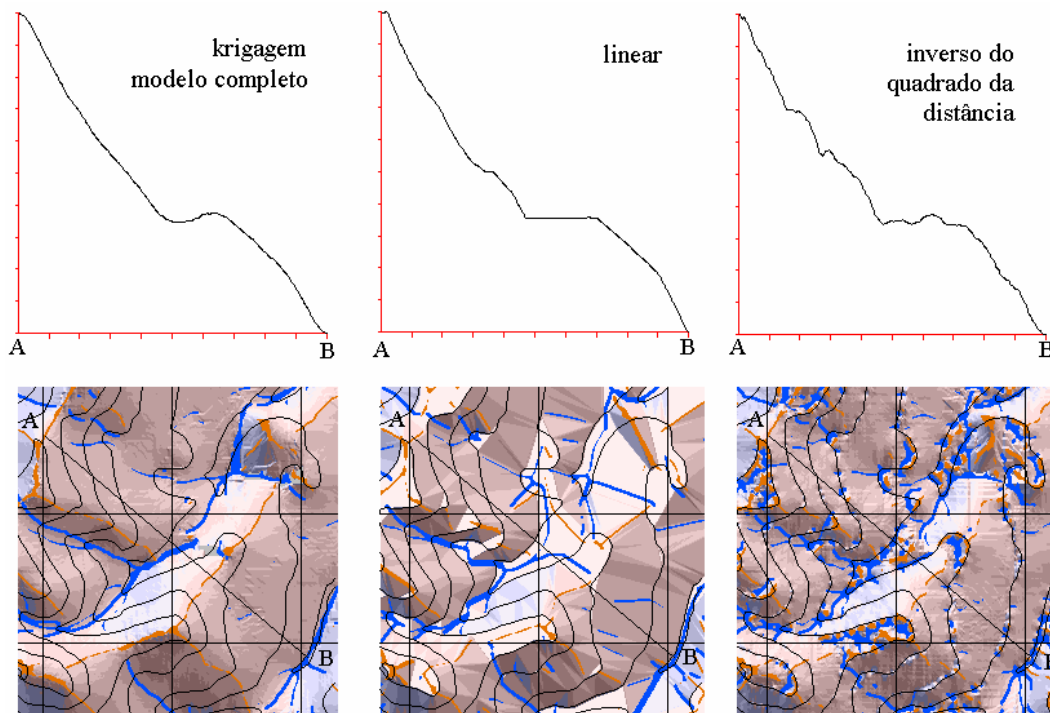


FIGURA 3.6 – Comparação entre superfícies obtidas com diferentes interpoladores.

A observação da frequência relativa da altitude interpolada, além de suas aplicações na interpretação dos dados em si, traz um importante indicador da qualidade dos MDE. Histogramas da altitude de formas naturais de relevo apresentam distribuição contínua e eventuais singularidades devem estar associadas a feições passíveis de reconhecimento (Figura 3.7). Por exemplo, as altitudes de frequência mínima na área de Ubatuba, em torno de 800m-900m correspondem à escarpa da Serra do Mar, onde uma grande amplitude altimétrica é percorrida em curta distância horizontal; a distribuição bimodal da altitude do rio Jacuí, devido ao escalonamento da microbacia em dois patamares; o histograma enviesado da microbacia do rio Bangu indica o estreitamento da calha em direção à embocadura; enfim, a distribuição relativamente uniforme das demais áreas decorre do tipo de relevo dominante, mais suave.

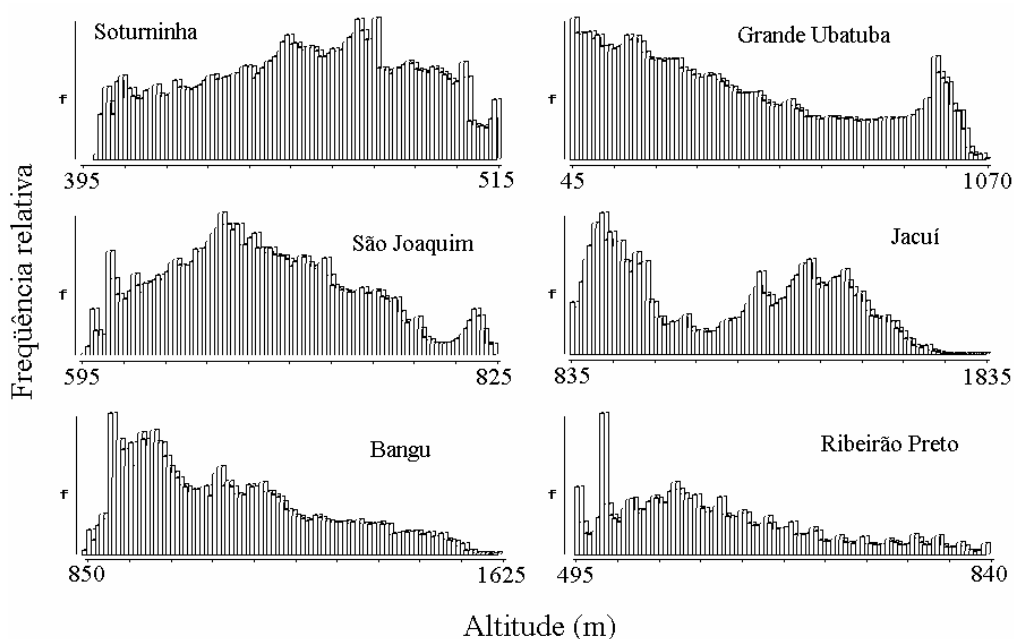


FIGURA 3.7 – Histogramas da altitude das microbacias estudadas.

Uma exceção que deve ser ressaltada em relação aos MDE obtidos por krigagem foi a microbacia do Ribeirão Preto, onde a distribuição dos valores de elevação apresentou características semelhantes aos MDE interpolados por IQD, com picos de frequência centrados nas altitudes correspondentes às curvas de nível (Figura 3.8). Entre as

possíveis causas desse efeito, pode-se apontar, além do tipo de relevo, as condições extremas de generalização dos dados desta área: a maior área de microbacia (34.620ha), a menor densidade de pontos digitalizados (~1,2 pontos por hectare) e o maior alcance do modelo de semivariograma (7.220m).

Outra avaliação foi feita em relação à dimensão vertical dos MDE, sobretudo quando submetido a processos de derivação, como o cálculo da declividade, curvatura e inflexões. Os processos derivativos, pela sua capacidade de realçar estruturas geométricas sutis, são exigentes em relação à qualidade e ao realismo com que os MDE representam o relevo. Considerando as situações correntes de relevo, os dados de uma área contígua devem apresentar uma distribuição contínua de altitude e, conseqüentemente, de declividade, conforme se observa na Figura 3.8 para a superfície krigada.

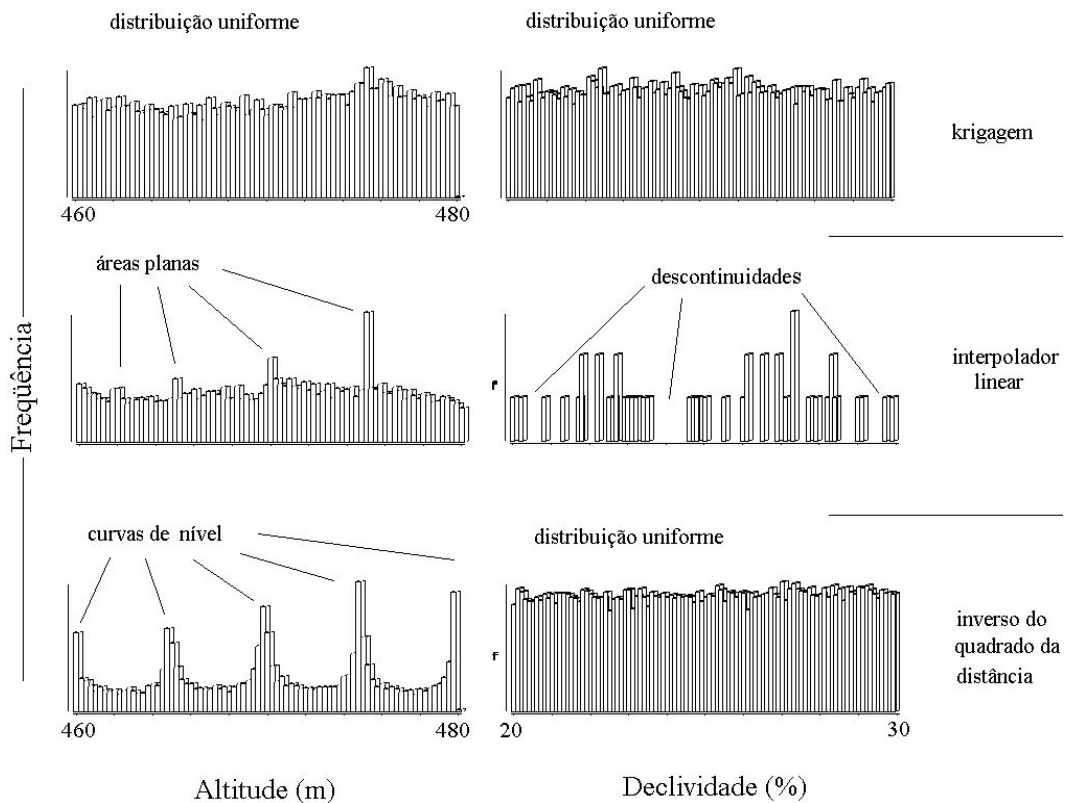


FIGURA 3.8 – Detalhe de histogramas da altitude e da declividade obtidos sobre diferentes MDE de uma mesma área.

Conforme se verifica na Figura 3.8, as áreas retilíneas planas produzidas pelo interpolador linear resultam nos picos de frequência observados nos histogramas de altitude. A presença de arestas entre as facetas assim produzidas corresponde a transições abruptas de declividade, manifestadas em descontinuidades nos respectivos histogramas. Embora permita uma distribuição contínua e uniforme de valores de declividade, os interpoladores IQD se caracterizaram pelo agrupamento das cotas altimétricas estimadas em torno dos valores existentes nas curvas de nível.

Estes problemas significam uma importante limitação à análise numérica do relevo, dada a impossibilidade de uma derivação confiável do MDE interpolados linearmente ou por IQD, na geração de PI de declividade e, conseqüentemente, de diversas variáveis de natureza semelhante. Dos elementos utilizados para a classificação de unidades de relevo (Giles & Franklin, 1998; Meijerink, 1988; Doornkamp & King, 1971), o aspecto (orientação de vertentes), curvatura horizontal e vertical (perfil) são dependentes de processos derivativos, permanecendo viáveis, pela utilização direta da altitude, somente a hipsometria e a altura do relevo.

Valeriano & Garcia (2000) demonstraram que o cálculo de declividade com operação de janelas de 3x3 pixels apresenta uma dispersão crescente à medida que a declividade aumenta. Tal dispersão foi diminuída com a aplicação de filtro média sobre o PI de declividade, ocorrendo então um ligeiro aumento da correlação com os dados de controle. A suavização com filtro média aplicado diretamente no MDE, ao contrário, causou um decréscimo da correlação. O cálculo da declividade foi considerado muito sensível às diminutas flutuações, ou rugosidades, do MDE, porém as suavizações a posteriori se mostraram indesejáveis, por agregar os valores de elevação independentemente da situação local. A diferença entre o processo de suavização causado pelo efeito pepita na krigagem e aquele experimentado por meio de filtros espaciais é que o primeiro atua somente nas áreas onde os dados de uma vizinhança indicam maior variância espacial, em outras palavras, áreas de maior rugosidade. Observando a variação da declividade ao longo de um transecto (Figura 3.9), verifica-se que as ligeiras flutuações impostas ao MDE pela inclusão da aleatoriedade (efeito

pepita) causam uma certa suavização da declividade, quando comparados com os resultados provenientes de interpolador linear e IQD. A variação da declividade do MDE krigado acompanhou aquela dos demais MDE, porém com menores variações a curtas distâncias na região de maior declividade.

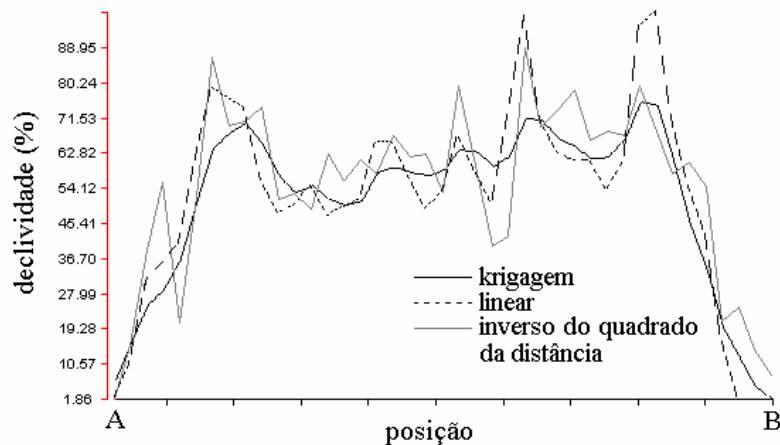


FIGURA 3.9 – Perfil da declividade de diferentes MDE ao longo de um mesmo transecto.

Ranieri et al. (1998) atribuíram à baixa confiabilidade das variáveis topográficas a escolha de métodos lógicos em relação a métodos numéricos para avaliação da degradação de microbacias em SIG. As iniciativas para superar esse problema devem abarcar o processamento dos dados topográficos desde sua preparação, que confere ao MDE as características que devem condicionar o desempenho de todos os demais processos. Considerada por muitos uma técnica trabalhosa e computacionalmente cara, a krigagem permite a formação de MDE passíveis de extração de variáveis para análise numérica. Uma vez que parte do trabalho, correspondente à amostragem dos dados topográficos, pôde ser automatizada, restam ainda como principais exigências a análise geoestatística, que requer conhecimento e trabalho por parte do operador, e a diferença de tempo computacional.

Fazendo um teste rápido com um conjunto de 50 pontos amostrais, a interpolação para uma grade regular de 1000 linhas por 1000 colunas, em computador pessoal (AMD-K6[™], processador 3D, 400MHz, 24MB RAM), os intervalos de tempo necessários

foram de 3, 50, 280 e 350 segundos, respectivamente, para interpolação linear, IQD, krigagem com modelo esférico e gaussiano, numa proporção de 1, 17, 93 e 118 unidades de tempo. Mesmo diante da variação de velocidade sob diferentes distribuições de amostras e outros condicionantes, isso fornece uma percepção da diferença que se pode esperar. À parte desta relativa desvantagem, deve-se ter em mente a demanda de qualidade das informações extraídas do MDE e sua aplicabilidade além das finalidades previstas, uma vez que a interpolação corresponde à montagem de um banco de dados digital, cujo uso e duração serão indefinidos. A velocidade dos computadores, por sua vez, é uma questão ligada aos avanços da tecnologia de informática e vem evoluindo numa progressão tal que os computadores pessoais levam períodos de tempo cada vez menores para terem sua velocidade aumentada 100 vezes.

CAPÍTULO 4

CONCLUSÕES

Seis processos, em essência, integraram a elaboração de MDE a partir de cartas topográficas usando krigagem: digitalização, conversões, amostragem, análise de tendência, análise geoestatística e a interpolação. A observação desses processos e seus efeitos sobre dados topográficos de 6 microbacias distintas levou às seguintes conclusões:

1 - Semivariogramas de regiões com mesmo tipo de relevo apresentaram alcance da dependência espacial variável, em função das dimensões da área sob análise. Por extensão, parâmetros geoestatísticos de um experimento não têm utilidade para outro, cabendo melhor, portanto, a expressão “variáveis geoestatísticas”.

2 – Em todas as microbacias, a análise de tendência foi necessária para a obtenção de semivariogramas com patamar definido mediante a análise geoestatística dos resíduos.

3 – O caráter inexato da krigagem, quando incorporada a componente aleatória, reduz a ocorrência de artefatos dos MDE. Como efeito indesejável, a suavização de pontos de máxima e mínima reduz a amplitude altimétrica em áreas de relevo íngreme.

4 – A krigagem produziu formas de relevo e feições de drenagem mais realistas do que os interpoladores linear e Inverso do Quadrado da Distância (IQD), representando com flexibilidade relevos suaves a montanhosos.

5 – Problemas relacionados à generalização dos dados topográficos não foram superados pelas vantagens da krigagem.

6- As características de distribuição da altitude e da declividade dos MDE obtidos por interpoladores lineares e IQD mostraram-se inadequadas para a análise numérica das formas de relevo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Blomgren, S. A digital elevation model for estimating flooding scenarios at the Falsterbo Peninsula. **Environmental Modelling & Software**, v. 14, p. 579-587, 1999.
- Borga, M.; Vizzaccaro, A. On the interpolation of hydrologic variables: formal equivalence of multiquadratic surface fitting and kriging. **Journal of Hydrology**, v. 5, n. 2, p. 160-171, 1997.
- Burrough, P. A. **Spatial aspects of ecological data**. In: Jongman, R. H.; ter Braak, C. J. F.; Tongeren, O. F. R. Data analysis in community and landscape ecology. Wageningen: Pudoc (Ed.), p. 213-251, 1987.
- Castro, A. G.; Valério Filho, M. Simulação da expectativa de perdas de solo em microbacia sob diferentes manejos florestais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, n.3, p.419-26, 1997.
- Desmet, P. J. J.; Govers, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51, n. 5, p. 427-433, 1996.
- Dornkamp, J. C; King, C. A. M. **Numerical analysis in Geomorphology: An Introduction**. London: Edward Arnold Ltd., 1971. 372p.
- Eastman, J. R. **Idrisi for Windows: User's Guide**. Worcester: Clark University, 1995. 440p.
- Gao, J. Comparison of sampling schemes in constructing DTMs from topographic maps. **ITC Journal**, v.1995, n.1, p. 18-22, 1995.
- Giles, P.T.; Franklin, S.E. Comparison of derivative topographic surfaces of a DEM generated from stereoscopic SPOT images with field measurements. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v.62, n.10, p.1165-1171. 1996.

- Giles, P.T.; Franklin, S.E. An automated approach to the classification of the slope units using digital data. **Geomorphology**, v.21, p251-264. 1998.
- Golden Software. **Surfer Version 6.01- Surface Mapping System**. Golden: Golden Software, Inc., 1995.
- Iri, M.; Shimakawa, Y.; Nagai, T. Extraction of invariants from digital elevation data with application to terrain topography. **Nonlinear Analysis**, v.47, p.5585-5598. 2001.
- Isaaks, E. H.; Srivastava, R. M. **An Introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. p.140-182.
- Kinnel, P. I. A slope length factor for applying the USLE-M to erosion in grid cells. **Soil and Tillage Research**, v.58, n.1, p.11-17, 2001.
- Kubik, K.; Botman, A. G. Interpolation accuracy for topographic and geological surface. **ITC Journal**, v.1976, n.2, pp. 236-273, 1976.
- Li, Z. Variation of the accuracy of digital terrain models with sampling interval. **Photogrammetric Record**, v.14, n.79, p.113-128, 1992.
- Meijerink, A. M. J. Data acquisition and data capture through terrain mapping units. **ITC Journal**, v.1988, n. 1, p.23-44, 1988.
- Miliaresis, G. Geomorphometric mapping of Zagros Ranges at regional scale. **Computers and Geosciences**, v.27, n.7, p.715-728, 2001.
- Miliaresis, G.; Argialas, D. Segmentation of physiographic features from the global digital elevation model/GTOPO30. **Computers and Geosciences**, v.25, n.7, p.715-728, 1999.
- Minitab Inc. **Meet MINITAB, Release 13 for Windows**. Pennsylvania: State College, 2000. não paginado.
- Molnár, D. K.; Julien, P. Y. Estimation of upland erosion using GIS. **Computers and Geosciences**, v.24, n.2, p.183-192, 1998.

Östman, A.. Quality control of photogrammetrically sampled Digital Elevation Models. **Photogrammetric Record**, v.12, n.69, 333-341, 1987.

Özdamar, L.; Demirhan, M.; Özpınar, A. A comparison of spatial interpolation methods and a fuzzy areal evaluation scheme in environmental site characterization. **Computers, Environment and Urban Systems**, v.23, p.399-422, 1999.

Pannatier, Y. **VarioWin: Software for Spatial Data Analysis in 2D**. New York: Springer-Verlag, 1996.

Ranieri, S. B. L.; Sparovek, G.; Souza, M. P.; Dourado Neto, D. Aplicação de índice comparativo na avaliação do risco de degradação das terras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n.4, p.751-60, 1998.

Valeriano, M. M.; Garcia, G. J. The estimate of topographical variables for soil erosion modelling through geoprocessing. International Congress of Photogrammetry and Remote Sensing, 33. Amsterdam, 2000. **International Archives of Photogrammetry & Remote Sensing**. Amsterdam: ISPRS, 2000, v.33, part B, p.678-685.

Valeriano, M. M.; Moraes, J. F. L. Extração de rede de drenagem e divisores por processamento digital de dados topográficos. [CD-ROM] In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, Foz do Iguaçu, 2001. **Anais**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2001. Posters.

Watson, D. F. **Contouring - A Guide to The Analysis and Display of Spatial Data**. Computer methods in The Geosciences, vol.10, s.l. Enchede: Elsevier Science, 1994.

APÊNDICE A

LINHAS DE COMANDO DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM (Arquivo de macro, *Idrisi Macro Language: ATB.iml*)

ATB.IML:

```
initial x cotas 2 1 0 1 BASE_NNN m
xyzidris x XYZ_NNN.dat cotas plane m 1.0
pointras x cotas cotas 1
delete x cotas.vec
delete x cotas.dvc
sample x base_NNN 1 5000 aleat
initial x aleat 2 1 0 1 base_NNN m
convert x aleat aleat i 2 2 2
convert x aleat aleat v 2 2 2
pointras x aleat aleat 3
delete x aleat.vec
delete x aleat.dvc
overlay x 3 aleat cotas cota_a1
pointvec x cota_a1 cota_a1
convert x cota_a1 cota_a1 v 2 2 2
srfidris x 2 cota_a1 AT1_NNN
delete x cota_a1.vec
delete x cota_a1.dvc
sample x base_NNN 1 7500 aleat
convert x aleat aleat v 2 2 2
pointras x aleat aleat 3
reclass x i aleat aleat2 2 0 -999 0 1 1
999 -9999
overlay x 3 aleat2 cotas cota_a2
pointvec x cota_a2 cota_a2
convert x cota_a2 cota_a2 v 2 2 2
srfidris x 2 cota_a2 AT2_NNN
delete x cota_a2.vec
delete x cota_a2.dvc
sample x base_NNN 1 10000 aleat
convert x aleat aleat v 2 2 2
pointras x aleat aleat 3
reclass x i aleat aleat2 2 0 -999 0 1 1
999 -9999
overlay x 3 aleat2 cotas cota_a3
pointvec x cota_a3 cota_a3
convert x cota_a3 cota_a3 v 2 2 2
srfidris x 2 cota_a3 AT3_NNN
delete x cota_a3.vec
delete x cota_a3.dvc
sample x base_NNN 1 15000 aleat
convert x aleat aleat v 2 2 2
pointras x aleat aleat 3
reclass x i aleat aleat2 2 0 -999 0 1 1
999 -9999
overlay x 3 aleat2 cotas cota_a4
pointvec x cota_a4 cota_a4
convert x cota_a4 cota_a4 v 2 2 2
srfidris x 2 cota_a4 AT4_NNN
delete x cota_a4.vec
delete x cota_a4.dvc
sample x base_NNN 1 29999 aleat
convert x aleat aleat v 2 2 2
pointras x aleat aleat 3
delete x aleat.vec
delete x aleat.dvc
reclass x i aleat aleat2 2 0 -999 0 1 1
999 -9999
overlay x 3 aleat2 cotas cota_a5
delete x cotas.img
delete x cotas.doc
pointvec x cota_a5 cota_a5
convert x cota_a5 cota_a5 v 2 2 2
srfidris x 2 cota_a5 AT5_NNN
delete x cota_a5.vec
delete x cota_a5.dvc
delete x aleat.img
delete x aleat.doc
delete x aleat2.img
delete x aleat2.doc
overlay x 3 BOOL_NNN cota_a1 cota_am
delete x cota_a1.img
delete x cota_a1.doc
pointvec x cota_am cota_am
convert x cota_am cota_am v 2 2 2
srfidris x 2 cota_am AB1_NNN
overlay x 3 BOOL_NNN cota_a2 cota_am
delete x cota_a2.img
delete x cota_a2.doc
pointvec x cota_am cota_am
convert x cota_am cota_am v 2 2 2
srfidris x 2 cota_am AB2_NNN
overlay x 3 BOOL_NNN cota_a3 cota_am
delete x cota_a3.img
delete x cota_a3.doc
pointvec x cota_am cota_am
convert x cota_am cota_am v 2 2 2
srfidris x 2 cota_am AB3_NNN
overlay x 3 BOOL_NNN cota_a4 cota_am
delete x cota_a4.img
delete x cota_a4.doc
pointvec x cota_am cota_am
convert x cota_am cota_am v 2 2 2
srfidris x 2 cota_am AB4_NNN
overlay x 3 BOOL_NNN cota_a5 cota_am
delete x cota_a5.img
delete x cota_a5.doc
pointvec x cota_am cota_am
convert x cota_am cota_am v 2 2 2
srfidris x 2 cota_am AB5_NNN
delete x cota_am.vec
delete x cota_am.dvc
delete x cota_am.img
delete x cota_am.doc
```


APÊNDICE B

LINHAS DE COMANDO DO PROCESSO DE INTERPOLAÇÃO POR KRIGAGEM DAS 6 MICROBACIAS SOB DUAS RESOLUÇÕES ESPACIAIS

(arquivo de macro, *Golden Software Script Language: NTR.bas*)

NTR.bas:

```
SET srf=CreateObject("Surfer.App")
srf.GridData ("ztot_str.dat", xcol=0, ycol=1, zcol=2, xmin=716200, \
xmax=720180, ymin=7558390, ymax=7563370, xsize=20, ysize=20, nrow=250, ncol=200, \
GridMethod=1, OutGrid="str20.grd", outfmt=2, searchmethod=1, searchrad1=10000, Dupmethod=1, \
variotype1=2, varioscale1=1, variolength1=598, errorvariance=0.05)
srf.GridData ("ztot_str.dat", xcol=0, ycol=1, zcol=2, xmin=716200, \
xmax=720190, ymin=7558390, ymax=7563380, xsize=10, ysize=10, nrow=500, ncol=400, \
GridMethod=1, OutGrid="str10.grd", outfmt=2, searchmethod=1, searchrad1=10000, Dupmethod=1, \
variotype1=2, varioscale1=1, variolength1=598, errorvariance=0.05)
srf.GridData ("ztot_sjq.dat", xcol=0, ycol=1, zcol=2, xmin=239550, \
xmax=249730, ymin=7552800, ymax=7559780, xsize=20, ysize=20, nrow=350, ncol=510, \
GridMethod=1, OutGrid="sjq20.grd", outfmt=2, searchmethod=1, searchrad1=10000, Dupmethod=1, \
variotype1=2, varioscale1=0.95, variolength1=684, errorvariance=0.1)
srf.GridData ("ztot_sjq.dat", xcol=0, ycol=1, zcol=2, xmin=239550, \
xmax=249740, ymin=7552800, ymax=7559790, xsize=10, ysize=10, nrow=700, ncol=1020, \
GridMethod=1, OutGrid="sjq10.grd", outfmt=2, searchmethod=1, searchrad1=10000, Dupmethod=1, \
variotype1=2, varioscale1=0.95, variolength1=684, errorvariance=0.1)
srf.GridData ("ztot_bng.dat", xcol=0, ycol=1, zcol=2, xmin=509000, \
xmax=522980, ymin=7449700, ymax=7456680, xsize=20, ysize=20, nrow=350, ncol=700, \
GridMethod=1, OutGrid="bng20.grd", outfmt=2, searchmethod=1, searchrad1=10000, Dupmethod=1, \
variotype1=7, varioscale1=1, variolength1=2412, errorvariance=0.1)
srf.GridData ("ztot_bng.dat", xcol=0, ycol=1, zcol=2, xmin=509000, \
xmax=522980, ymin=7449700, ymax=7456660, xsize=30, ysize=30, nrow=233, ncol=467, \
GridMethod=1, OutGrid="bng30.grd", outfmt=2, searchmethod=1, searchrad1=10000, Dupmethod=1, \
variotype1=7, varioscale1=1, variolength1=2412, errorvariance=0.1)
srf.GridData ("ztot_btb.dat", xcol=0, ycol=1, zcol=2, xmin=480800, \
xmax=492770, ymin=7404800, ymax=7418780, xsize=30, ysize=30, nrow=467, ncol=400, \
GridMethod=1, OutGrid="btb30.grd", outfmt=2, searchmethod=1, searchrad1=10000, Dupmethod=1, \
variotype1=7, varioscale1=1, variolength1=3840, errorvariance=0.17)
srf.GridData ("ztot_btb.dat", xcol=0, ycol=1, zcol=2, xmin=480800, \
xmax=492780, ymin=7404800, ymax=7418780, xsize=20, ysize=20, nrow=700, ncol=600, \
GridMethod=1, OutGrid="btb20.grd", outfmt=2, searchmethod=1, searchrad1=10000, Dupmethod=1, \
variotype1=7, varioscale1=1, variolength1=3840, errorvariance=0.17)
srf.GridData ("ztot_jci.dat", xcol=0, ycol=1, zcol=2, xmin=501800, \
xmax=520970, ymin=7434240, ymax=7456230, xsize=30, ysize=30, nrow=734, ncol=640, \
GridMethod=1, OutGrid="jci30.grd", outfmt=2, searchmethod=1, searchrad1=10000, Dupmethod=1, \
variotype1=7, varioscale1=1, variolength1=4940, errorvariance=0.12)
srf.GridData ("ztot_jci.dat", xcol=0, ycol=1, zcol=2, xmin=501800, \
xmax=520980, ymin=7434240, ymax=7456220, xsize=20, ysize=20, nrow=1100, ncol=960, \
GridMethod=1, OutGrid="jci20.grd", outfmt=2, searchmethod=1, searchrad1=10000, Dupmethod=1, \
variotype1=7, varioscale1=1, variolength1=4940, errorvariance=0.12)
srf.GridData ("ztot_rbr.dat", xcol=0, ycol=1, zcol=2, xmin=195500, \
xmax=218270, ymin=7636370, ymax=7668740, xsize=30, ysize=30, nrow=1080, ncol=760, \
GridMethod=1, OutGrid="rbr30.grd", outfmt=2, searchmethod=1, searchrad1=10000, Dupmethod=1, \
variotype1=7, varioscale1=1, variolength1=7220, errorvariance=0.15)
srf.GridData ("ztot_rbr.dat", xcol=0, ycol=1, zcol=2, xmin=195500, \
xmax=218280, ymin=7636370, ymax=7668750, xsize=20, ysize=20, nrow=1620, ncol=1140, \
GridMethod=1, OutGrid="rbr20.grd", outfmt=2, searchmethod=1, searchrad1=10000, Dupmethod=1, \
variotype1=7, varioscale1=1, variolength1=7220, errorvariance=0.15)
```


APÊNDICE C

LINHAS DE COMANDO E PALETA DE CORES DO PROCESSO ADD (arquivo de macro, *Idrisi Macro Language: ADD.iml*)

ADD.iml:

```
surface x 2 NNN a # d 1
scalar x a a2 4 22.5
delete x a.img
delete x a.doc
reclass x i a2 ac1 2 0 -9 0 1 0 1 2 1 2 3
      2 3 4 3 4 5 4 5 6 5 6 7 6 7 8 7 8
      9 8 9 10 9 10 0 10 999999 -9999
reclass x i a2 ac2 2 0 -9 10 11 10 11 12
      11 12 13 12 13 14 13 14 15 14 15
      16 15 9999 -9999
delete x a2.img
delete x a2.doc
overlay x 1 ac1 ac2 ac
delete x ac2.img
delete x ac2.doc
delete x ac1.img
delete x ac1.doc
filter x NNN zf1 1
filter x zf1 zf2 1
filter x zf2 zf3 1
filter x zf3 zf4 1
filter x zf4 zf5 1
filter x zf5 zf6 1
delete x zf1.img
delete x zf2.img
delete x zf3.img
delete x zf4.img
delete x zf5.img
delete x zf1.doc
delete x zf2.doc
delete x zf3.doc
delete x zf4.doc
delete x zf5.doc
filter x zf6 e 6 0 0 0 -1 0 1 0 0 0
transfor x e abs 15
overlay x 4 e abs sinal
filter x sinal deriv2 6 0 0 0 -1 0 1 0 0 0
reclass x i deriv2 dive 2 0 -9 1 1 1 9
      -9999
filter x zf6 e 6 0 1 0 0 0 0 0 -1 0
transfor x e abs 15
overlay x 4 e abs sinal
filter x sinal deriv2 6 0 1 0 0 0 0 0 -1 0
reclass x i deriv2 divn 2 0 -9 1 1 1 9
      -9999
filter x zf6 e 6 1 0 0 0 0 0 0 0 -1
transfor x e abs 15
overlay x 4 e abs sinal
filter x sinal deriv2 6 1 0 0 0 0 0 0 0 -1
reclass x i deriv2 divnw 2 1 -9 -1 0 -1 9
      -9999
filter x zf6 e 6 0 0 1 0 0 0 0 -1 0 0
transfor x e abs 15
overlay x 4 e abs sinal
filter x sinal deriv2 6 0 0 1 0 0 0 0 -1 0 0
reclass x i deriv2 divne 2 1 -9 -1 0 -1 9
      -9999
overlay x 1 dive divn div12
overlay x 1 div12 divnw div123
overlay x 1 div123 divne div1234
reclass x i div1234 div 2 0 -9 1 1 1 9
      -9999
delete x zf6.img
delete x e.img
delete x sinal.img
delete x abs.img
delete x deriv2.img
```

(continua)

ADD.iml (continuação):

```

delete x dive.img
delete x divn.img
delete x divne.img
delete x divnw.img
delete x divl2.img
delete x divl23.img
delete x divl234.img
delete x zf6.doc
delete x e.doc
delete x sinal.doc
delete x abs.doc
delete x deriv2.doc
delete x dive.doc
delete x divn.doc
delete x divne.doc
delete x divnw.doc
delete x divl2.doc
delete x divl23.doc
delete x divl234.doc
filter x dre dref 1
filter x dref dre 1
reclass x i dre drec 2 0 -9 .5 1 .5 9
-9999
delete x dre.img
delete x dre.doc
filter x div divf 1

filter x divf divf2 1
delete x divf.img
delete x divf.doc
reclass x i divf2 div 2 0 -9 .66 1 .66 9
-9999
delete x divf2.img
delete x divf2.doc
scalar x div 2div 3 2
delete x div.img
delete x div.doc
overlay x 1 2div drec drediv
delete x drec.img
delete x drec.doc
delete x 2div.img
delete x 2div.doc
delete x dref.img
delete x dref.doc
reclass x i drediv ddsoma 2 0 -999 1 17 1
2 18 2 3 0 3 9999 -9999
delete x drediv.img
delete x drediv.doc
overlay x 9 ddsoma ac ADDNNN
delete x ddsoma.img
delete x ddsoma.doc
delete x ac.img
delete x ac.doc

```

A paleta de cores ADD, especificada abaixo, pode ser elaborada mediante a operação do *Palette Workshop*, integrante da barra de ferramentas do *Idrisi*.

Tabela C.1 – Distribuição de intensidade dos canais R, G e B (vermelho, verde e azul) da paleta de cores ADD.smp para o processo de visualização de superfícies numéricas

Classes	Canais			Classes	Canais		
	R	G	B		R	G	B
0	255	223	223	9	104	103	111
1	228	200	200	10	124	123	135
2	200	177	177	11	144	143	159
3	173	154	154	12	164	163	183
4	145	132	132	13	184	183	207
5	118	109	109	14	205	203	231
6	90	86	86	15	225	223	255
7	63	63	63	17	0	77	255
8	83	83	87	18	229	116	0