



Mapeamento da declividade em microbacias com Sistemas de Informação Geográfica¹



Márcio de M. Valeriano²

¹ Parte da Tese de Doutorado do autor, apresentada no IGCE/UNESP-Rio Claro, 1999

² Instituto Agronômico de Campinas, Campinas, SP, Brasil. Filiação atual: Instituto de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, SP. E-mail: valerian@ltid.inpe.br (Foto)

Protocolo 28 - 19/3/2002 - Aprovado em 13/5/2003

Resumo: Este trabalho busca estabelecer procedimentos ótimos para o mapeamento digital da declividade em microbacias com Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Através dos testes, avaliaram-se os métodos de geoprocessamento, de acordo com análises de regressão dos resultados digitais com um conjunto de dados cartográficos medidos manualmente. Análises estatísticas e geostatísticas dos resultados de declividade indicaram alta variabilidade, o que compromete mapeamentos generalizados. Dados de campo, por sua vez, mostraram pouca concordância com os resultados cartográficos e de SIG. Concluiu-se que o cálculo da declividade requer alta resolução do Modelo Digital do Terreno (MDT) interpolado através de krigagem. A suavização do MDT diminuiu a exatidão do cálculo da declividade, enquanto a suavização da própria imagem de declividade aumentou a correlação. Fatores de ajuste foram determinados para as diferentes condições de resolução e suavização testadas. Os erros da estimativa pelo método desenvolvido foram avaliados mediante o mapeamento dos resíduos padronizados.

Palavras-chave: geoprocessamento, MDE/MNT/MDT, resolução, suavização, erros

Digital mapping of slope angle in watersheds with Geographical Information Systems

Abstract: The objective of this study was to establish optimal procedures for the calculation of watershed slope using Geographical Information Systems (GIS). The tests evaluated the geoprocessing methods according to regression analyses with a cartographically hand-measured data set. Statistical and geostatistical analyses showed the high variability of slope values, turning cartographic generalization techniques inadequate. Field measured slopes showed low agreement with cartographic and GIS estimated values. It was concluded that slope angle calculations require high resolution of the Digital Terrain Model (DTM), interpolated through kriging. Smoothing the DTM decreased the slope determination accuracy, while increased correlation when applied to the slope image itself. Adjustment factors were calculated for different conditions of resolution and smoothing tested. The estimate errors in the developed method were evaluated by mapping the standardized residues.

Key words: geoprocessing, DTM/DEM, resolution, smoothing, errors

INTRODUÇÃO

A integração de dados ambientais para o planejamento territorial em microbacias com sistema de informação geográfica (SIG), tem sido experimentada sob variadas formas. Dados estruturados em imagens “*raster*” ligados a precipitação pluvial, solos, relevo e propriedades da vegetação, são sobrepostos para executar, de forma espacializada, análises do potencial e das fragilidades do terreno. Sistemas provêm automatização de análises para o planejamento territorial, como o programa SAMPA (Koffler, 1995) que faz a aplicação automática dos procedimentos da avaliação da aptidão agrícola das terras

(Ramalho Filho & Beek, 1994). De modo semelhante, Lopes-Assad (1995) operou em SIG os procedimentos da classificação da capacidade de uso (Lepsch et al., 1991).

A apresentação da declividade para este tipo de mapeamento foi, por muito tempo, feita em classes, dada a sua aplicação sob esta forma em metodologias de integração manual em mesas-de-luz. Este modo de mapeamento simplifica a representação cartográfica da declividade e funciona de acordo com as classes utilizadas nos sistemas de planejamento territorial, que se baseiam em critérios lógicos sobrepostos. O resultado cartográfico deste procedimento, conhecido como método do ábaco (De Biasi, 1970), compõe-se de polígonos de classes de declividade.

Técnicas mais recentes lidam com modelos de previsão de perda de solo. Através de sua inversão, é possível calcular a necessidade de práticas adequadas de manejo (Paez, 1992) assim como uma redistribuição de usos do solo, de forma a causar um nível aceitável de erosão. A aplicação deste princípio de forma espacializada depende do mapeamento do valor numérico das variáveis, dentre as quais a declividade, o que só se tornou operacional com o advento dos SIG's. O processamento automático no SIG dos dados topográficos para a geração do PI declividade é feito através de máscaras ou janelas móveis, explorando-se a função de derivação na vizinhança de cada célula (Valenzuela, 1991) para toda a área de interesse. Os sistemas atuais permitem uma série de opções para o cálculo da declividade podendo-se, inclusive, estabelecer uma formulação de cálculo próprio, elaborado pelo usuário (Eastman, 1995). Trabalhando em classes de declividade, Moretti et al. (1989) testaram diferentes funções de vizinhança, visando ao cálculo da declividade com várias operações existentes nas plataformas SIG atuais.

Pode-se dizer, portanto, que todos esses métodos envolvendo a avaliação do risco de erosão, baseados em modelagem numérica ou em decisões lógicas, lidam com a variável declividade. A medição manual da declividade sobre mapas com curvas de nível é um trabalho cansativo e sujeito a erros, porém a disponibilidade de programas que fazem o cálculo automaticamente, bem como o desconhecimento de seu desempenho, ainda não permitem que sejam obtidos PI de declividade confiáveis com facilidade. Ranieri et al. (1998) compararam métodos analíticos e lógicos para um estudo sobre escalas de trabalho, descartando os primeiros, em função da incerteza dos resultados numéricos. A exatidão das imagens

de variáveis numéricas da paisagem é pouco estudada (Weir, 1991) assim como é pouco freqüente sua obtenção com o uso de medidas reais, sejam de campo ou cartográficas. O volume de dados solicitados e as complicações advindas de simplificações da resolução geométrica (Cavalli & Valeriano, 2000) reforçam a necessidade de se desenvolver procedimentos adequados durante a aplicação das técnicas digitais disponíveis (Valeriano, 1999). Este trabalho visa ao estabelecimento de procedimentos em ambiente SIG, otimizados para a obtenção de imagens de declividade em microbacias.

MATERIAL E MÉTODOS

A microbacia do córrego São Joaquim estende-se por uma área de 3142 ha, no Nordeste do Estado de São Paulo, próximo ao município de Pirassununga (Figura 1). Está inserida na Depressão Periférica, na região denominada, por Almeida (1964) Médio Tietê, aproximadamente entre os paralelos 22°00' e 22°05'S e os meridianos 47°20' e 47°35'WG.

O córrego São Joaquim é afluente do ribeirão Descaroador, integrando a bacia do Rio Mogi-Guaçu. As altitudes variam entre 595 m na embocadura do São Joaquim e 822 m nos divisores perto das cabeceiras do afluente norte. O relevo dominante é suave ondulado a ondulado, constituído por sucessivos morros de topo subaplainado, com vertentes côncavas, em geral. Com menor freqüência, ocorrem morros de topo arredondado, com vertentes convexas e comprimento chegando a atingir 1500 m. A declividade se distribui, predominantemente, entre 2 e 20%.

Os dados topográficos utilizados provêm das cartas topográficas (IGC) 1:10000, com equidistância vertical de 5 m

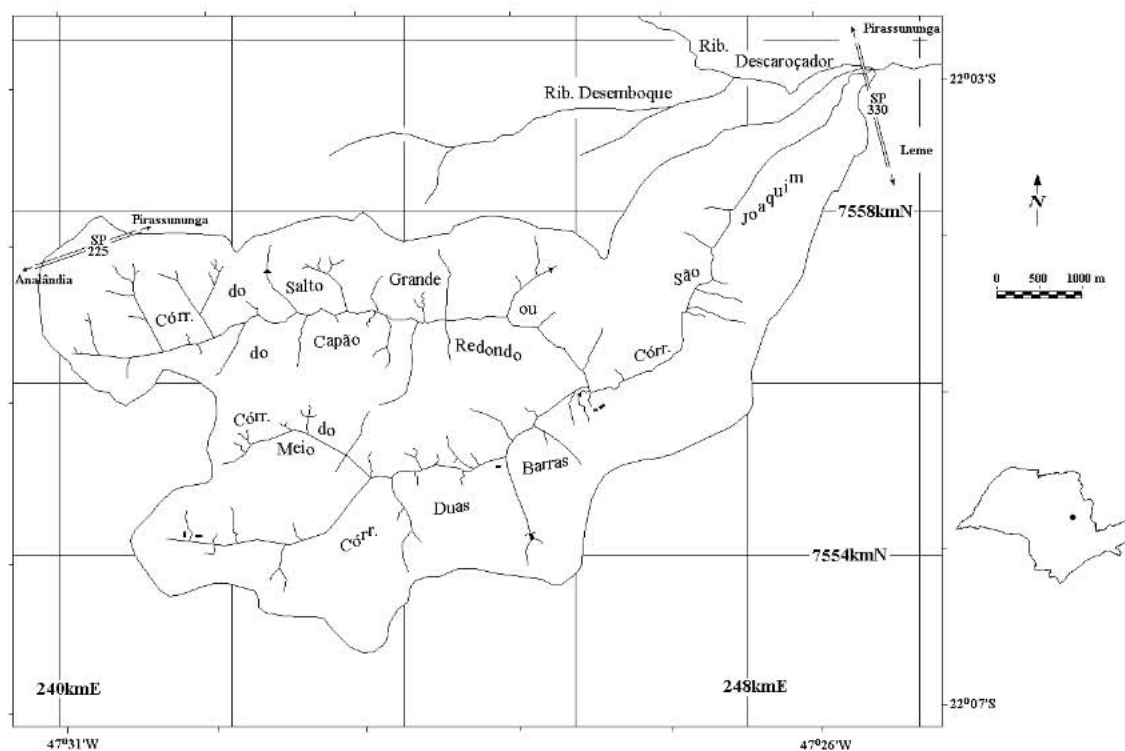


Figura 1. Localização da área de estudo

entre as curvas de nível, folhas Córrego São Joaquim, SF-23-Y-A-I-2-NE-D; Bairro Barroco, SF-23-Y-A-II-1-NO-C, e Bairro da Saúde, SF-23-Y-A-II-1-NO-E. Os dados digitalizados para o desenvolvimento deste trabalho provieram da carta topográfica (IAC) 1:20000, com equidistância vertical de 10 m, denominado Mapa Planialtimétrico da Microbacia do Córrego São Joaquim, compilado das mesmas cartas topográficas 1:10000 (IGC), já citadas.

Na Figura 2 estão apresentadas as curvas de nível digitalizadas através de um esquema de amostragem objetivo, em que se coletam dados que apresentam maior detalhamento. Gao (1995) recomenda este esquema de amostragem, proposital, em contraposição à amostragem sistemática, em que se amostram dados em espaçamentos regulares. Os pontos digitalizados das curvas foram transferidos para uma imagem (grade regular, sistemática) de 10 m de resolução, da qual foram reamostrados aleatoriamente 1000 pontos para a análise geoestatística com o programa VarioWin (Pannatier, 1996). A análise forneceu os parâmetros do modelo de variabilidade, os quais são necessários para a interpolação através de krigagem. Os parâmetros (escala, alcance, tipo de modelo e efeito pepita) foram aplicados em krigagens, visando à obtenção de MDT em grade regular nas resoluções de 20, 40, 100 e 200 m. O arquivo contendo todos os pontos digitalizados (que compõem as curvas de nível) foi exportado para o programa Surfer (Golden Software Inc., 1995) onde foi executada a interpolação.

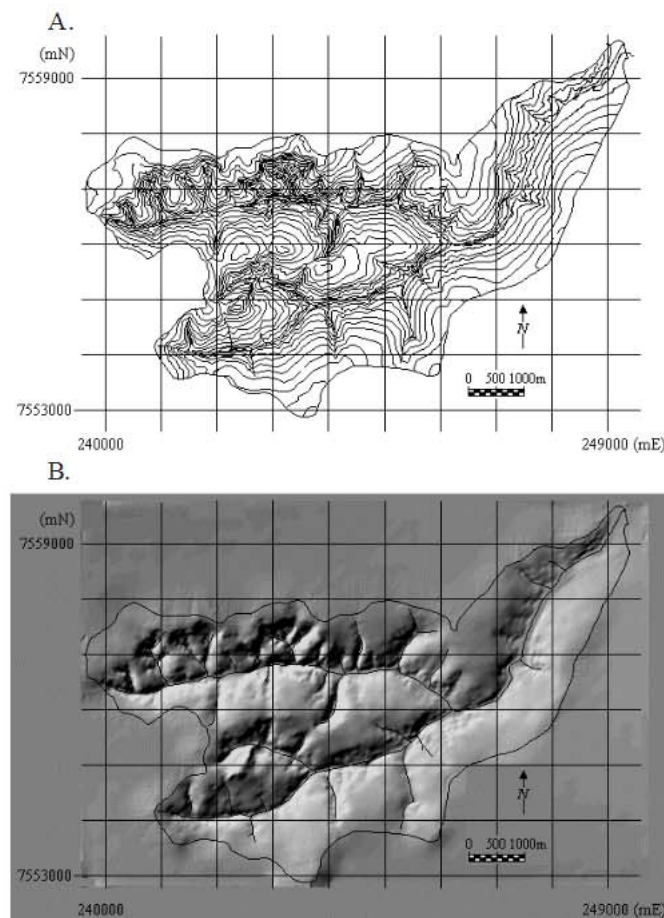


Figura 2. Curvas de nível digitalizadas (A) e o Modelo Digital do Terreno (MDT) formado com a resolução de 20 m (B)

As grades (ou imagens) de MDT foram operadas por funções de declividade do próprio Idrisi (Eastman, 1995) sob variadas condições de resolução e suavização. Para se testar os efeitos da resolução de imagem, a declividade foi gerada sobre as grades com 20, 40, 100 e 200 m. Escolhida a melhor condição, a aplicação de filtros de suavização (média na janela móvel de 3 x 3 células) foi testada sobre o MDT, assim como sobre a própria imagem de declividade.

Os valores de declividade foram medidos graficamente no mapa, numa grade de 200 m de espaçamento. A resolução de 200 m foi estabelecida para uma amostragem sistemática, inicialmente, porém houve a necessidade de um esquema de amostragem adicional (Figura 3), indicada pela análise geoestatística preliminar dos dados de declividade. A análise cartográfica foi feita, também, de maneira seletiva para pontos escolhidos, por apresentarem declividade muito alta. Os três esquemas forneceram o total de 916 amostras.

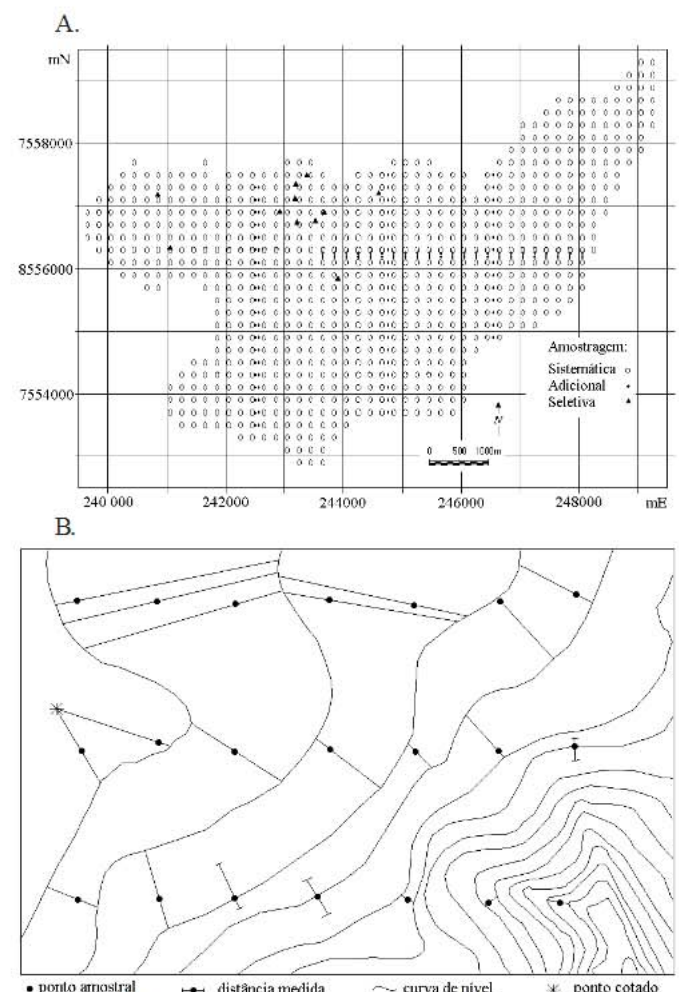


Figura 3. Dados cartográficos para controle: localização das amostras (A) e método de medição das distâncias horizontais para o cálculo da declividade (B)

A declividade foi medida cartograficamente, com binando-se a distância entre as curvas de nível adjacentes ao ponto amostral (distância horizontal), a escala do mapa e a equidistância entre curvas (distância vertical). Nos topos, a distância vertical foi calculada com apoio dos pontos cotados (Figura 3).

Quando o ponto amostral coincidiu com canais de drenagem, a distância horizontal foi medida entre as curvas de nível, na direção do canal.

Além das medições cartográficas, a declividade foi medida no campo em 27 pontos, ao longo de vertentes representativas do relevo da microbacia, que constituem uma amostragem parcial. Os valores de declividade foram medidos com clinômetro, com visada entre balizas distanciadas 20 m. Com o dado de controle, a declividade foi medida cartograficamente sobre a base 1:10.000 (IGC) nas mesmas posições levantadas no campo.

Os dados de declividade medidos foram submetidos à análise exploratória, mediante estatísticas descritivas (MINITAB™ Inc., 1995) e análise geoestatística (VarioWin, Pannatier, 1996). De cada imagem de declividade testada em SIG foram extraídos os valores de declividade correspondentes às posições determinadas na amostragem da Figura 3. Os valores correspondentes foram pareados para análises de regressão (MINITAB™) em que foram avaliados os coeficientes de correlação/determinação, as equações de ajuste e os erros. Para verificar as condições de maiores desvios da estimativa, foram calculados os resíduos padronizados (Neter & Wassermann, 1974) da declividade. O resíduo padronizado de uma estimativa é o desvio (erro) normalizado pelo valor observado da variável. Os resíduos padronizados da declividade (obtida com os métodos selecionados) foram estruturados em uma imagem, para o mapeamento dos erros.

Os dados de campo, levantados em uma pequena amostragem parcial, foram avaliados de maneira mais expedita. Foram formados os pares com a medição cartográfica (1:10.000) e os resultados de SIG extraídos nos pontos correspondentes e plotados em diagrama de dispersão (campo vs. carta e campo vs. SIG) como apoio à discussão dos resultados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise exploratória dos dados de declividade medida mostrou que a distribuição se concentra em torno dos valores mais baixos, com forte assimetria (Figura 4A). Visto que as medidas analisadas constituíram uma cobertura sistemática da área, diz-se que altas declividades correspondem a uma situação relativamente rara, quando se considera uma microbacia por inteiro.

Para o estabelecimento do modelo de variabilidade espacial por geoestatística, as medições de declividade tiveram que ser suplementadas em linhas adicionais, para estreitar a distância mínima de pares de pontos para 100 m e, em seguida, para 50 m. Este procedimento foi necessário para evidenciar o modelo de semivariograma da declividade, cuja dependência espacial mostrou-se fraca demais para fazê-lo sob a grade de 200 m. Observou-se grande aumento da variabilidade a curtas distâncias (Figura 4B) evidenciado pela forte inclinação inicial do modelo exponencial. Observando-se a escala relativa da semivariância (escala à direita do semivariograma) verifica-se que distâncias de 200 m correspondem a mais de 50% da variabilidade total. Essas características espaciais e estatísticas obrigam o mapeamento da declividade, independente do método, à adoção de espaçamentos curtos para possibilitar uma representatividade adequada. No caso de imageamento

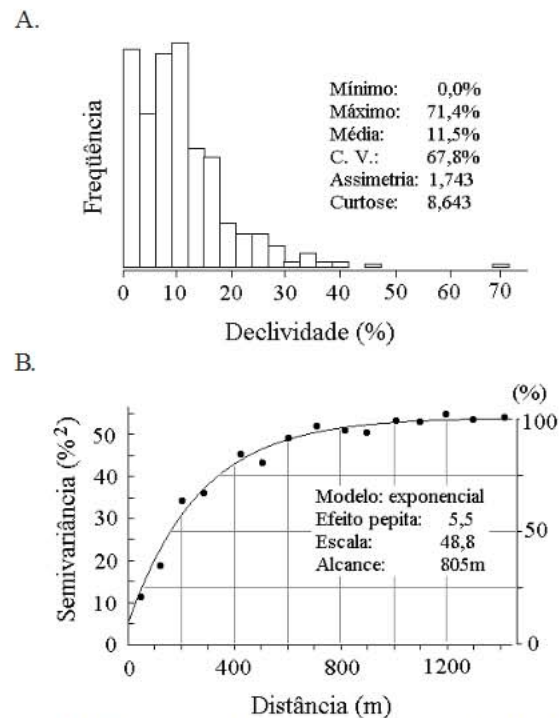


Figura 4. Histograma (A) e semivariograma (B) dos dados de declividade medida

em escalas mais generalizadas, em que a capacidade de armazenamento e de fluxo de dados condiciona a resolução espacial a centenas de metros, cada pixel poderá comportar diferentes condições de declividade. Portanto, uma descrição adequada da declividade em escalas muito generalizadas não é possível com um único plano de informação podendo-se, em ambiente SIG, armazenar múltiplas imagens para este fim, relativas às características da distribuição (máximo, mínimo, média e desvio-padrão, por exemplo).

Para a declividade calculada por SIG, a resolução do MDT afetou sensivelmente os resultados, limitando a declividade máxima de modo sistemático, com o aumento das dimensões do pixel (Figura 5A), além de promover maior dispersão dos dados. Os coeficientes de determinação (r^2) responderam ao aumento de dispersão, diminuindo sistematicamente com a redução da resolução, de 20 a 200 m. Thompson et al. (2001) relatam este efeito, mesmo entre grades de alta resolução, com a diminuição do intervalo de variação da declividade, entre as resoluções de 10 a 30 m. As curvas teóricas de declividade máxima da Figura 5B, calculadas para a situação de máxima diferença de cotas armazenadas em células de vizinhas na imagem, mostram o efeito da resolução.

A recomendação por altas resoluções espaciais para a obtenção da declividade não pode sempre ser atendida; entretanto, o usuário deve considerar, também, a alteração da sensibilidade do cálculo, conforme se pode observar nos coeficientes das equações da Tabela 1. Se não é possível determinar com precisão a declividade em certos casos, convém ao menos aplicar um ajuste para correção da magnitude dos resultados. Este efeito deve explicar as conclusões de Molnár & Julien (1998) que apontam uma subestimação pela Equação Universal de Perda de Solo, quando operada com pixel maior que 100 m.

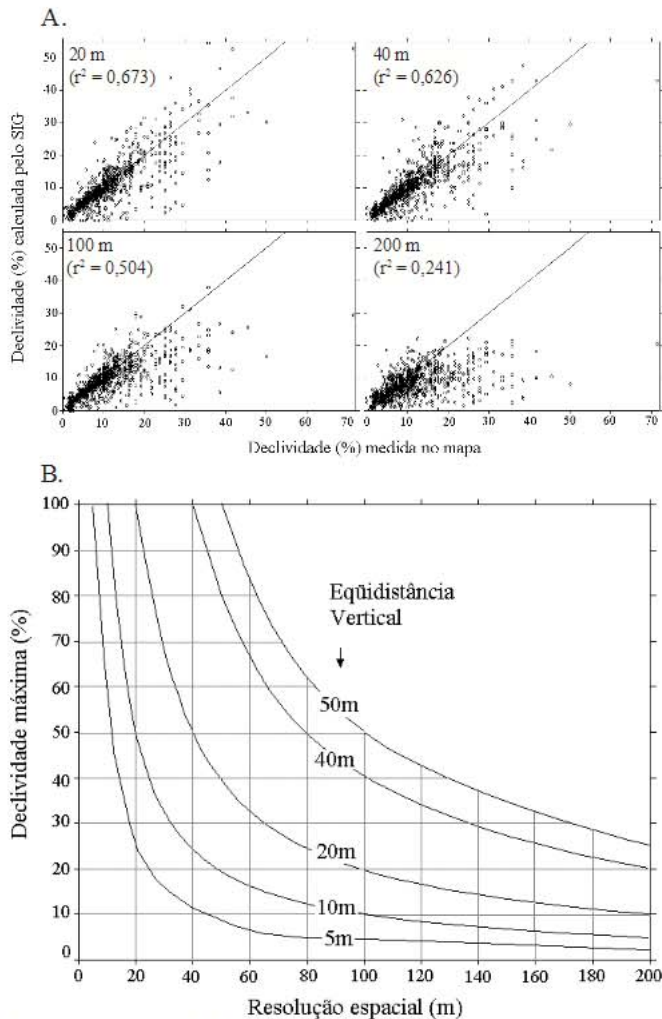


Figura 5. Efeitos da resolução espacial sobre a declividade obtida em SIG: dispersão dos resultados experimentais (A) e redução da declividade máxima calculada teoricamente (B)

Tabela 1. Equações de ajuste da declividade obtida em cálculo digital pelo SIG (s), nas resoluções de 20, 40, 100 e 200 m, em relação aos resultados do controle cartográfico (S)

| Resolução (m) | Equação de Regressão | Ajuste Simples | R ² (%) |
|---------------|--------------------------------|----------------|--------------------|
| 20 | $S = 2,38^{**} + 0,831^{**} s$ | $S = 0,975 s$ | 67,3 ^{**} |
| 40 | $S = 2,21^{**} + 0,862^{**} s$ | $S = 1,000 s$ | 62,6 ^{**} |
| 100 | $S = 1,93^{**} + 0,985^{**} s$ | $S = 1,130 s$ | 50,4 ^{**} |
| 200 | $S = 3,87^{**} + 0,915^{**} s$ | $S = 1,290 s$ | 24,1 ^{**} |

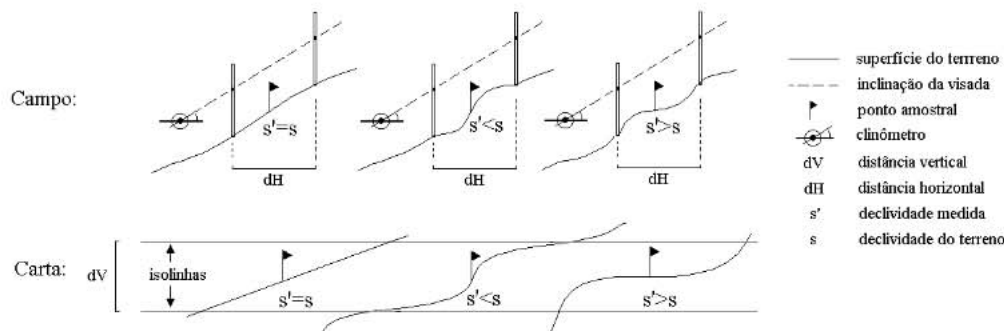


Figura 6. Erros de estimativa na medição da declividade no campo e em carta topográfica

Exceto para o cálculo sob a resolução de 200 m, as constantes e os coeficientes angulares da Tabela 1 mostraram tendência sistemática, decrescendo as primeiras e crescendo os últimos, à medida que se trabalha com resoluções cada vez menores, indicando diminuição na sensibilidade da determinação por SIG, quando a variação das estimativas tem que ser multiplicada para adquirir a amplitude dos resultados observados.

A cartografia, em si, já traz uma forte limitação numérica da mesma natureza para a representação da declividade, causada pela generalização do relevo em isolinhas (Robinson et al., 1978). Na Figura 6 estão ilustrados casos possíveis de erros de estimativa ante um único valor de declividade medido (s'), no campo ou na carta topográfica.

No campo, a medida do clinômetro requer a adoção de uma distância de visada fixa, que pode abranger variações locais de declividade (Figura 6). Na carta topográfica, as mesmas variações podem ocorrer ao longo da distância horizontal entre as isolinhas. Em ambos os casos, o relevo mais uniforme (exemplos da esquerda) tende a causar menos erros de estimativa. Dada a menor frequência de declividades altas, esperam-se mais frequentemente subestimativas ($s' < s$) que superestimativas ($s' > s$). Os dados de campo confirmam isto, bem como mostram dispersão dos dados cartográficos e de SIG em relação ao campo (Figura 7), muito superior àquela observada entre a cartografia e o SIG (Figura 5).

A suavização mostrou efeitos inversos quando aplicada antes ou depois do cálculo da declividade pelo SIG (Tabela 2). A suavização da declividade obtida em SIG trouxe vantagens até a quarta aplicação sucessiva, quando o coeficiente de determinação atingiu o máximo. Por outro lado, a suavização prévia do MDT afetou do mesmo modo que a generalização causada por resoluções mais fracas, aumentando a dispersão e diminuindo a correlação. Num exemplo contraposto, Eastman (1995) recomenda a suavização do MDT após a sua geração, antes de operar a declividade, "para eliminar arestas". A obtenção do MDT, naquele caso, foi descrita por Eastman (1995) como feita por interpolador linear, de características muito diferentes dos MDT deste trabalho, obtidos por krigagem (Watson, 1994).

Quando aplicada na própria imagem de declividade, a suavização causou um espalhamento das áreas de valores altos e um leve decréscimo na dispersão em relação aos dados de controle (não apresentado), como efeito do filtro de média na sensibilidade indesejável do cálculo de declividade pelo SIG. A atenuação dos possíveis erros posicionais, causada pela suavização, é outro mecanismo capaz de reduzir a dispersão, em bora este efeito não tenha sido determinado neste trabalho.

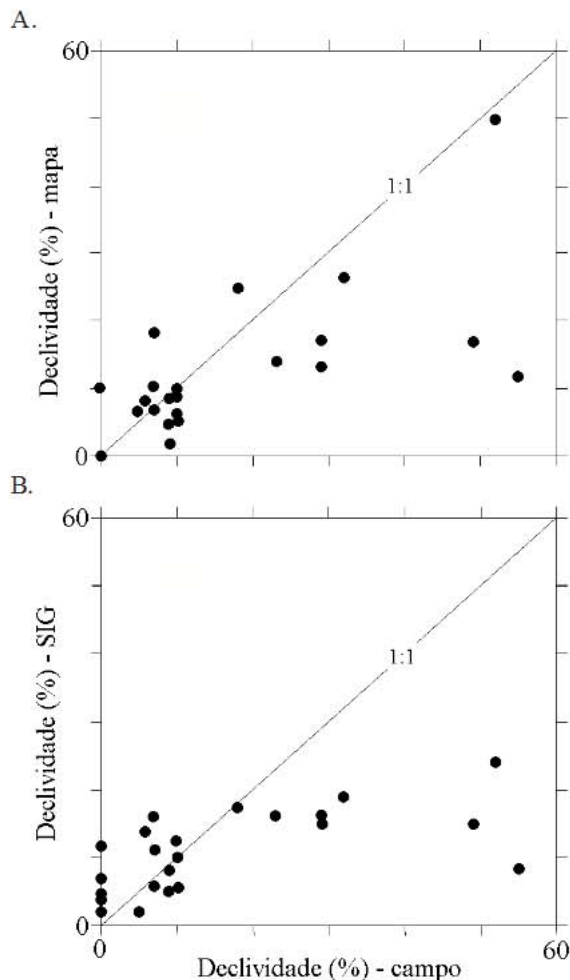


Figura 7. Dispersão dos valores de declividade de mapa (A) e de SIG (B) em relação aos dados de campo

Tabela 2. Efeito de suavizações sucessivas sobre os coeficientes de determinação (R^2) da declividade calculada por SIG

| Imagem Suavizada | Número de Filtragens (%) | | | | |
|------------------|--------------------------|------|------|------|------|
| | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| MDT | 67,3 | 48,5 | 47,6 | 37,3 | 29,7 |
| Declividade | 67,3 | 71,5 | 72,6 | 72,9 | 73,2 |

Uma vez que a suavização dos resultados do cálculo em SIG da declividade trouxe aumento no coeficiente de correlação com o controle cartográfico, são apresentadas, na Tabela 3, as equações de ajuste para resultados suavizados até 6 vezes.

Tabela 3. Equações de ajuste da declividade medida em cálculo digital pelo SIG (s), suavizada de 1 a 6 vezes (filtro de média, janela móvel de 3x3) em relação aos resultados do controle cartográfico (S)

| Suavização | Equação de Regressão | Ajuste Simples | R^2 (%) |
|------------|---------------------------------|--------------------|--------------------|
| nenhuma | $S = 2,380^{**} + 0,831^{**} s$ | $S = 0,975^{**} s$ | 67,3 ^{**} |
| 1 vez | $S = 1,490^{**} + 0,910^{**} s$ | $S = 1,00^{**} s$ | 71,5 ^{**} |
| 2 vezes | $S = 1,080^{**} + 0,947^{**} s$ | $S = 1,02^{**} s$ | 72,6 ^{**} |
| 3 vezes | $S = 0,795^{**} + 0,973^{**} s$ | $S = 1,02^{**} s$ | 72,9 ^{**} |
| 4 vezes | $S = 0,491^{ns} + 0,999^{**} s$ | $S = 1,03^{**} s$ | 73,2 ^{**} |
| 5 vezes | $S = 0,300^{ns} + 1,020^{**} s$ | $S = 1,04^{**} s$ | 73,2 ^{**} |
| 6 vezes | $S = 0,140^{ns} + 1,030^{**} s$ | $S = 1,04^{**} s$ | 73,1 ^{**} |

As suavizações tendem a causar redução na sensibilidade do cálculo requerendo, para o ajuste, coeficientes angulares cada vez maiores. Com o aumento desses coeficientes, a constante diminui, perdendo significância como estimador a partir da quarta suavização. Esses efeitos da resolução e da suavização podem ser explicados pelas propriedades espaciais e estatísticas da declividade do terreno, como indicaram as análises. Técnicas de processamento que causam generalização da informação topográfica tendem a obscurecer as declividades mais altas.

Identificaram-se, ao longo das análises, algumas condições para a otimização do cálculo da declividade em SIG, com o alta resolução espacial, aplicações de filtro de suavização sobre a imagem resultante e ajuste numérico da mesma. No presente trabalho, foram estabelecidos como a melhor condição testada, a resolução de 20 m, 4 suavizações sucessivas com filtro de média 3x3 e o ajuste simples, um acréscimo de 3% (ou, na forma da Tabela 3, $S = 1,03s$). A imagem de declividade assim obtida foi finalmente submetida a análises de comparação, dispersão e erros.

As relações entre as variáveis topográficas medidas e estimadas por SIG podem ser verificadas visualmente, comparando-se as imagens a suas correspondentes de controle, apresentadas sob a mesma estrutura geográfica e mesma legenda (Figura 8). É necessário apenas que se abstraia as diferenças de resolução entre as imagens.

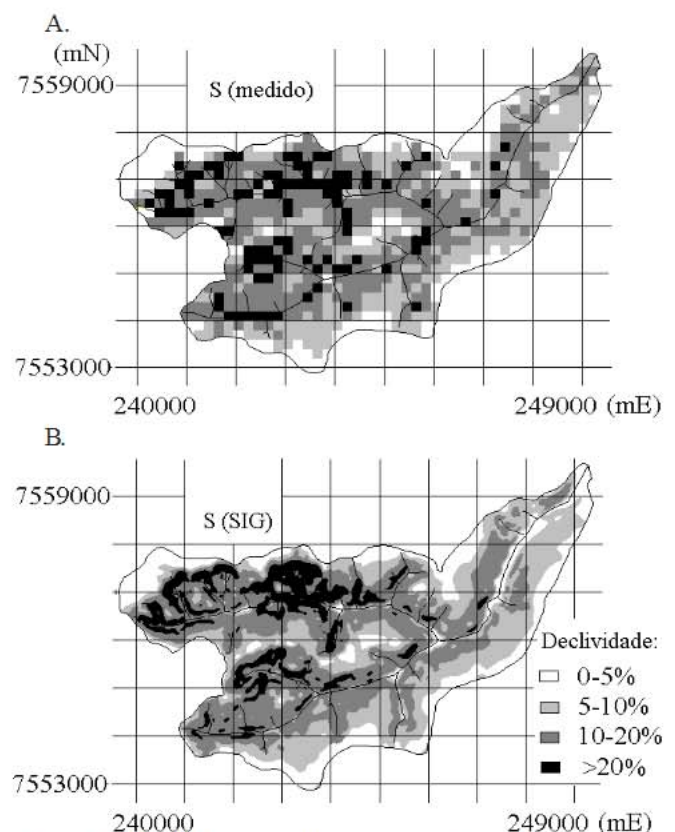


Figura 8. Resultados medidos (A) e estimados (B) para declividade

A distribuição espacial da declividade do SIG e dos dados de controle apresentaram-se com relativa concordância, quando se observam ambos os mapas classificados nas faixas de variação apresentadas. A análise de regressão indicou que

o mapeamento da declividade por SIG respondeu por 73,2% da variação da declividade medida e a dispersão (Figura 9A) mostrou que o cálculo teve desempenho superior em áreas de terreno suave, apresentando diferenças ocasionais em áreas mais íngremes.

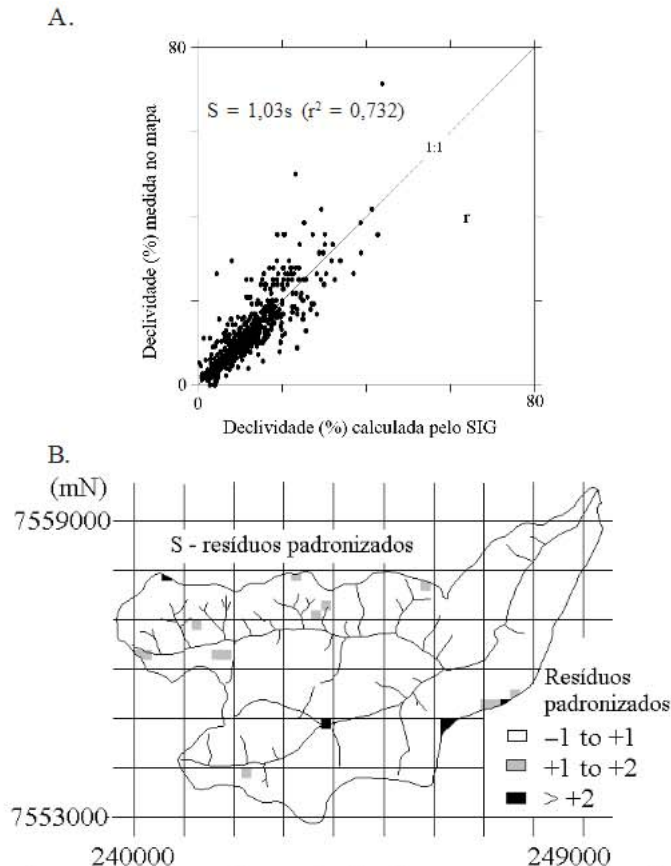


Figura 9. Avaliação dos resultados de SIG para estimativa da declividade: diagrama de dispersão (A) e distribuição espacial dos resíduos padronizados (B)

A distribuição dos resíduos padronizados da declividade (Figura 9B) mostrou que a estimativa desenvolvida deteminou a variável com resíduos entre -1 e 1 para quase toda a área. O resíduo da estimativa foi maior que 2 apenas em pontos críticos, tais como os divisores de água e canais de drenagem. Os locais de resíduos entre 1 e 2 mostraram a mesma tendência, com poucas exceções.

CONCLUSÕES

1. O mapeamento da declividade requer alta resolução espacial para uma representatividade adequada de sua variação, sobretudo na faixa de valores altos.
2. Para o mapeamento em escalas generalizadas, sugere-se o armazenamento de múltiplos planos de informações para sua descrição adequada.
3. Considera-se desaconselhável o cálculo da declividade com resolução menor que 20 - 40 m.
4. A redução da sensibilidade do mapeamento pode ser corrigida com ajustes numéricos.

5. Os procedimentos selecionados levaram a uma correlação de ($R^2 = 0,732$) com uma dispersão relativamente maior para declividades altas.

6. Observações de campo mostraram que o levantamento topográfico generaliza a informação da superfície de modo suficiente para descaracterizar a variação da declividade em escala detalhada.

7. Uma inexactidão maior que aquela causada pela estimativa da declividade por SIG é originada já no processo de mapeamento sistemático, para a produção cartográfica.

8. A estimativa da declividade foi afetada pela conformação local do relevo.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho integra o projeto “Padronização de metodologias para tratamento de dados topográficos de microbacias”, financiado pelo CNPq. O autor agradece a participação dos colegas Douglas Pereira de Souza, Gilberto Nóbrega da Luz e Olavo de Freitas Caires, do IAC, durante o levantamento de campo; MINITAB™ é uma marca da Minitab Inc. nos Estados Unidos e outros países e foi usada neste trabalho com permissão do fabricante.

LITERATURA CITADA

- Almeida, F.F.M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. Boletim, Instituto Geográfico e Geológico, São Paulo, n.41, p.167-262, 1964.
- Cavalli, A.C.; Valeriano, M.M. Suavização da declividade em função da resolução da imagem em sistema de informação geográfica. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.4, n.2, p.295-298, 2000.
- De Biasi, M. Cartas de declividade: confecção e utilização. Geomorfologia, São Paulo, n.21, p.8-12, 1970.
- 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, Wagenigen, v.1, p.18-22, 1995.
- Golden Software. Surfer Version 6.01- Surface mapping system. Golden: Golden Software, Inc. 1995.
- Koffler, N.F. SAMPA: Sistema de análise ambiental para planejamento agrícola (versão 2.0). Rio Claro: UNESP/IGCE, 1995. 34p. Manual do usuário
- Lepsch, I.F.; Belinazzi Jr., R.; Bertolini, D.; Espindola, C.R. Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso. 4.a. aproximação. Campinas: SBCC, 1991. 175p.
- Lopes-Assad, M.L. Uso de sistema de informações geográficas na determinação da aptidão agrícola de terras. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v.19, n.1, p.133-9, 1995.
- MINITAB Inc. Meet MINITAB, Release 13 for Windows. Pennsylvania: State College, 2000.
- Molnár, D.K.; Julien, P.Y. Estimation of upland erosion using GIS. Computers and Geosciences, Nepean, v.24, n.2, p.183-192, 1998.

- Moretti, E.; Koffler, N.F.; Teixeira, A.L.A. Técnicas digitais para mapeamento de declividade e orientação de vertentes baseadas no uso de sistemas de informação geográfica. *Boletim de Geografia Teórica*, Rio Claro, v.19, n.37, p.29-52, 1989.
- Neter, J.; Wassermann, W. *Applied linear statistical models: regression, analysis of variance and experimental designs*. Homewood: Irwin, R. D., 1974. 842p.
- Paez, M.L. *Diseño de practicas de conservacion con la ecuacion universal de perdida de suelo*. Mérida. 2nd ed., 1992. 130p. CIDIAT, Serie Suelos y Clima, SC-64.
- Pannatier, Y. *VarioWin: Software for spatial data analysis in 2D*. New York: Springer-Verlag, 1996.
- Ramalho Filho, A.; Beek, K.J. *Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras*. 3.ed. rev. Rio de Janeiro: EMBRAPA/CNPQ. 65p. 1994.
- 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*, Viçosa, v.22, n.4, p.751-60, 1998.
- Robinson, A.H.; Sale, R.D.; Morrison, J.L.; Muehrcke, P.C. Processing and generalizing geographical data. In: Robinson, A.H.; Sale, R.D.; Morrison, J.L.; Muehrcke, P.C. *Elements of cartography*. New York: John Wiley and Sons, 1978, cap. 6, p.106-136.
- Thompson, J.A.; Bell, J.C.; Butler, C.A. Digital elevation model resolution: effects on terrain attribute calculation and quantitative soil-landscape modeling. *Geoderma*, Amsterdam, n.100, p.67-89, 2001.
- Valenzuela, C.R. Data analysis and models. In: Belward, A.S.; Valenzuela, C.R. *Remote sensing and geographical information systems for resource management in developing countries*. In: Euro Courses: Remote Sensing, v.1. Kluwer: Kluwer Academic Publishers, 1991. cap. 18, p.335-348.
- Valeriano, M.M. Estimativa de variáveis topográficas para modelagem da perda de solos por geoprocessamento. Rio Claro: UNESP, 1999. 172p. Tese Doutorado
- Watson, D.F. *Contouring: A guide to the analysis and display of spatial data*. Computer methods in The Geosciences, Amsterdam: Elsevier Science, v.10, 1994.
- Weir, M.J.C. Errors in geographic information systems. In: Belward, A.S.; Valenzuela, C.R. *Remote sensing and geographical information systems for resource management in developing countries*. Euro Courses: Remote Sensing, v.1. Kluwer: Kluwer Academic Publishers, 1991. cap. 19, p.349-355.