

Derivação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) em coordenadas geográficas

Márcio de Morisson Valeriano^{1,2}
Paulo Cesar Gurgel de Albuquerque¹

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
valerian@dsr.inpe.br; gurgel@dsr.inpe.br
²Bolsista do CNPq

Abstract. This paper focuses conceptually-based cares to be observed when dealing with geographical coordinates in the derivation of broad-coverage Digital Elevation Models (DEM), as SRTM, GDEM/ASTER and the upcoming surveys. The derivation of slope was tested under two conditions for computing the horizontal component. In the more rigorous approach, DEM pixels are taken as rectangles with dimensions determined by the geodetic relation between coordinates units and the corresponding terrain (horizontal) distance, in the latitudinal and longitudinal directions. In the test area (32° S), the resulting pixel dimensions of a square spacing grid of 1" were approximately 25m and 31m (x and y), a distortion of 25% from the implicit relation assumed in the direct application of derivation filters. The incoming errors from the simple (square) approach, with deviances up to 4°, reflected an underestimation of slope angles prevailing in the E and W slopes. Proportionally to the results from the rectangular approach, errors were mostly distributed up to 25%, with outliers above 50%. These errors were correlated to steepness, and enough to alter the slope-interval class (towards gentler relief) of 8,6% of the tested area. Of the E and W oriented slopes, 13% of the area was misclassified. Regarding the relief classes themselves, the proportional area of misclassification increased according to the steepness of the relief, with 64% of steepest areas (slopes from 20% to 45%) falling into the preceding slope class (8% to 20%).

Key words: topography, DEM, derivation, geomorphometry, cartography.

1. Introdução

O banco de dados Topodata (Brasil, 2008) foi desenvolvido para fornecer planos de informação das variáveis geomorfométricas locais básicas para pronto uso em SIG. Estes dados foram produzidos com padronização de processamento (Valeriano e Albuquerque, 2010) e de especificações técnicas (Valeriano, 2008), a partir de um refinamento unificado (Valeriano e Rossetti, 2012) dos dados SRTM (Rabus et al., 2003) disponibilizados para a América do Sul. A escala de utilização recomendada varia, em função do tipo de aplicação e de suas exigências, de 1:100.000 a 1:250.000, embora trabalhos considerem seu uso em 1:50.000, ainda que numa condição desfavorecida (Miceli et al., 2011). Quanto a escalas mais gerais do que 1:250.000, seu uso é teoricamente adequado do ponto de vista da exatidão cartográfica, embora as técnicas apropriadas para generalização de dados geomorfométricos em SIG estejam ainda em desenvolvimento. No entanto, muitas aplicações requerem níveis de especificações técnicas dos dados tais como escala/resolução, exatidão e precisão que não são atingidos pelos produtos do Topodata, mesmo que estes sejam usados apenas como entrada para o cálculo da variável de interesse.

A análise do terreno se estrutura em componentes locais e regionais em diferentes níveis de generalização de tal modo que diferentes atributos se tornam dominantes de acordo com a escala de observação, das quais se levantam questões de naturezas distintas (Hagget et al., 1965). Quando se consideram os problemas observados em escalas mais detalhadas, de modo geral, há uma tendência a se abordarem técnicas descritas como pertencentes à geomorfologia específica, em contraposição à geomorfologia geral (Gowdie, 1981). Enquanto esta se atém a descritores geométricos e gravitacionais do relevo, a geomorfologia específica trata de questões que estão relacionadas a processos particulares de determinados locais ou fenômenos, que não podem ser atendidas por variáveis geomorfométricas básicas como as fornecidas pelo Topodata, que são puramente geomorfométricas. Portanto, a construção de

um banco de dados geomorfométricos de cobertura ampla em escalas de detalhe é uma perspectiva que tende a um limite, devido ao interesse estratégico relativamente menor para a geomorfologia específica, sobretudo quando se consideram os custos de sua elaboração.

A favor do atendimento à análise do terreno em escalas mais detalhadas está a crescente disponibilidade de dados em MDE de resolução mais fina, a começar pelo GDEM/ASTER – *Global Digital Elevation Model* - (ERSDAC, 2009) e, entre aqueles que devem sucedê-lo em cobertura global, TanDEM-X (Rodriguez-Cassola et al., 2010), assim como levantamentos localizados em alto detalhamento, na forma direta (desde teodolito) ou com sensores aerotransportados em VANTs (Lejot et al., 2007), inclusive com sensores Lidar (Glenna et al., 2006). Além disso, atuais facilidades de processamento têm favorecido a produção de planos de informação de variáveis geomorfométricas pela comunidade de usuários de Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Os programas SAGA (Conrad, 2006) e *Whitebox* (Lindsay, 2014), por exemplo, de livre acesso para análises de dados espaciais, fornecem recursos avançados para a análise de MDE, integrados às funções básicas de um sistema de informação geográfica. A estes avanços, tecnológicos, se soma a crescente parcela da comunidade científica que é solicitada a lidar com o processamento de MDE para a derivação de informações topográficas de interesse.

No contexto de SIG, a maioria das informações topográficas recai sobre as diferentes modalidades de derivação da altimetria, calculada sobre grades de registros altimétricos ou, em última instância, Modelos Digitais de Elevação (MDE). As variáveis topográficas básicas são obtidas a partir dos valores de MDE em derivações que podem ser obtidas por diferenças aplicadas em transformações trigonométricas ou através da derivação analítica de funções bivariadas (de x e y) ajustadas aos dados (Moore et al., 1993). Em ambos os casos, são incluídos dados alcançados por um operador de vizinhança (janela móvel ou, coloquialmente, filtro), de tamanho variável, e o resultado é armazenado em sua posição central (Figura 1).

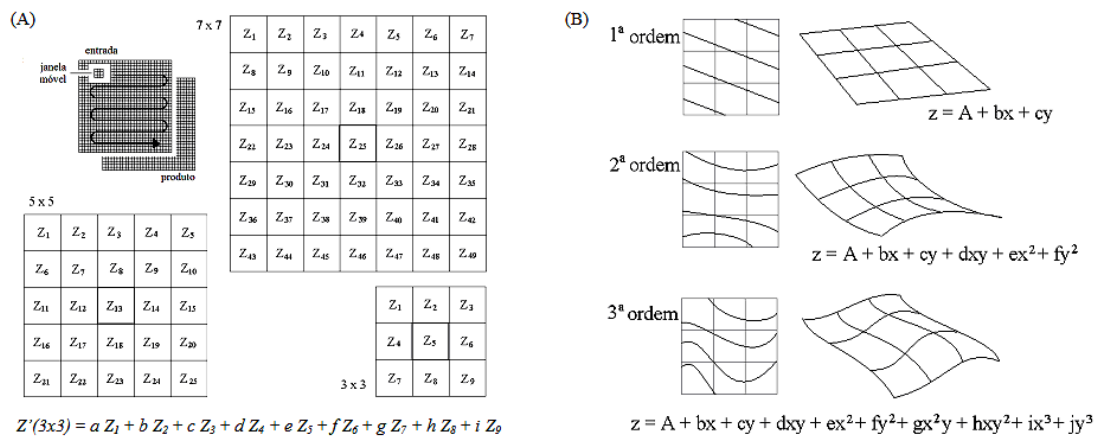


Figura 1 – Janelas móveis e sua aplicação em planos de informação: cálculos diretos entre as cotas alcançadas pela janela móvel (A); polinômios de 1^a, 2^a e 3^a ordem ajustados a um segmento de superfície para derivação analítica (B).

No exemplo da declividade, é uma relação entre o desnível e a distância correspondente que caracteriza uma medida de declividade, bastando expressar tal razão em porcentagem. Em outras palavras, analisa-se o diferencial da altimetria naquele intervalo de derivação. Da mesma forma, as demais derivações geomorfométricas são cálculos que envolvem diferenciais entre cotas vizinhas a serem consideradas diante das distâncias nas quais são expressas. No caso da abordagem analítica, a dimensão horizontal está implícita nas posições dadas pelos conjuntos x,y,z de cada célula de entrada para a juste de superfícies. Assim, a simples derivação das equações expressa diretamente os ângulos de interesse e seus

diferenciais. No caso da abordagem geométrica, as distâncias horizontais têm que ser declaradas em operações escalares após a operação das janelas móveis, uma vez que nestas são comparadas apenas as cotas altimétricas da vizinhança para a determinação do desnível que ocorre naquele intervalo de distância.

A distância horizontal requerida para a derivação não está explícita nas posições de uma grade regular de SIG cuja georreferência esteja em coordenadas geográficas. Portanto, a operação das janelas móveis deve considerar a relação entre diferenças de coordenadas geográficas e distâncias lineares em projeção. A relação mais simples entre coordenada geográfica e distância de superfície adota uma formulação que considera a Terra esférica. Esta determina o comprimento de arco de 1" na latitude Y (S_Y) em função do raio da Terra esférica no equador (R_0 , igual a 6378137m):

$$S_Y = 1'' \text{ (em radianos)} \times R_0 \cos Y \quad (1)$$

Para o referencial WGS84, a forma elipsóide da Terra leva a considerar os raios de semi-eixo maior e menor (respectivamente, a , igual a 6378137m, e b , calculados em função do fator de achatamento, igual a 1/298,257223563), que determinam a excentricidade (e) como:

$$e = [(a - b)^{1/2} / a]^{1/2} \quad (2)$$

Assim, o comprimento do arco no paralelo de latitude Y (S_Y) é determinado pela equação:

$$S_Y = [a / (1 - e^2 \sin^2 Y)^{1/2}] \cos Y \quad (3)$$

O comprimento de um arco de 1" no meridiano (distância latitudinal), do Equador a uma determinada latitude (y), é calculado em função do raio de curvatura da seção meridiana (M):

$$S_Y = \int_{\{0,y\}} M dY \quad (4)$$

O raio de curvatura da seção meridiana (M), por sua vez, é dado por:

$$M = a (1 - e^2) / (1 - e^2 \sin^2 y)^{3/2} \quad (5)$$

Os resultados deste cálculo mostraram que as distâncias latitudinais variaram em menos de 1% desde o Equador até a latitude de 60°, com valores em torno de 30,833m.

A exemplo do que foi feito com os dados SRTM, os levantamentos em cobertura ampla são estruturados em coordenadas geográficas desde a aquisição dos dados, por um imposição das técnicas de posicionamento dos sensores, e os dados mantêm-se assim, desejavelmente, até sua disponibilização. Alternativa amplamente acessível de maior evidência em relação ao Topodata para a derivação de variáveis geomorfométricas no território brasileiro, o GDEM/ASTER também tem seus dados na forma não-projetada, com georreferência em coordenadas geográficas. Diante da perspectiva da derivação de MDE com uso de janelas móveis adaptadas diretamente de cálculos estruturados para MDE em grades quadradas, este trabalho tem como objetivos mostrar os impactos da estrutura em coordenadas geográficas e apresentar alternativas para o problema.

2. Material e métodos

Foi selecionada uma área de 15kmx15km, de posição central nas coordenadas 53° 20' W e 32° 06' S, de relevo que varia de plano a forte-ondulado, com predomínio de ondulado, e altitudes de 50m a 300m, aproximadamente. Como dado de entrada para os processamentos testados, foi usado o MDE do Topodata (Brasil, 2008), de onde foram obtidos também os planos de informações que subsidiaram as análises, declividade e orientação de vertentes, nas suas formas numéricas e classificadas.

Para exemplificar os processos de derivação, a variável declividade foi escolhida pela sua natureza primordial em relação às demais derivações geomorfométricas. Os cálculos de derivação foram feitos de acordo com a rotina pré-programada para o cálculo da declividade

no âmbito do desenvolvimento do Topodata (Valeriano e Albuquerque, 2010), cujo funcionamento foi modificado para representar as técnicas a serem avaliadas.

As distâncias horizontais associadas à latitude foram calculadas para um arco de 1" (1 arco-segundo), a resolução do MDE Topodata, a partir de programa de lote (macro) em planilha, através das Equações 1, 2 e 3, e inseridas no algoritmo de derivação da declividade. Para simular a operação de janela móvel no modo simples, o mesmo algoritmo foi adaptado, com a substituição da distância longitudinal calculada para a latitude local pelo valor (constante) da distância latitudinal, 31,833m, resultando numa grade quadrada. O restante do algoritmo, as formas de derivação e os processos pós-derivação foram mantidos para livrar as comparações de diferenças secundárias.

Todas as operações aritméticas entre ângulos e suas análises foram feitas após a conversão para graus, de modo a garantir a linearidade das relações e proporcionalidade na comparação de resultados. Para observação das relações entre os resultados e a orientação de vertentes, os ângulos azimutais foram linearizados com transformações trigonométricas (seno e cosseno) e, devido à simetria radial esperada no padrão espacial dos efeitos, adotou-se o módulo dessas transformações.

3. Resultados e discussão

Dos resultados das Equações 1, 2 e 3 observa-se que próximo ao Equador temos células (*pixels*) do MDE quase quadradas. Na área de estudo (~32° S), a distância longitudinal de 1 arco-segundo corresponde a aproximadamente 25m, o que faz cada célula do MDE representar um retângulo de aproximadamente 25mx31m no terreno (Figura 2). Assim, as distâncias entre células vizinhas apresentam anisotropia de 25% a mais no eixo N-S. Nos eixos diagonais (NE-SW e NW-SE) de uma janela de dimensões 3x3, as distâncias correspondem à hipotenusa das distâncias latitudinais e longitudinais. Portanto, não há como compensar uma suposta proporção entre as resoluções de áreas em latitudes diferentes: há também uma distorção das relações de distância.

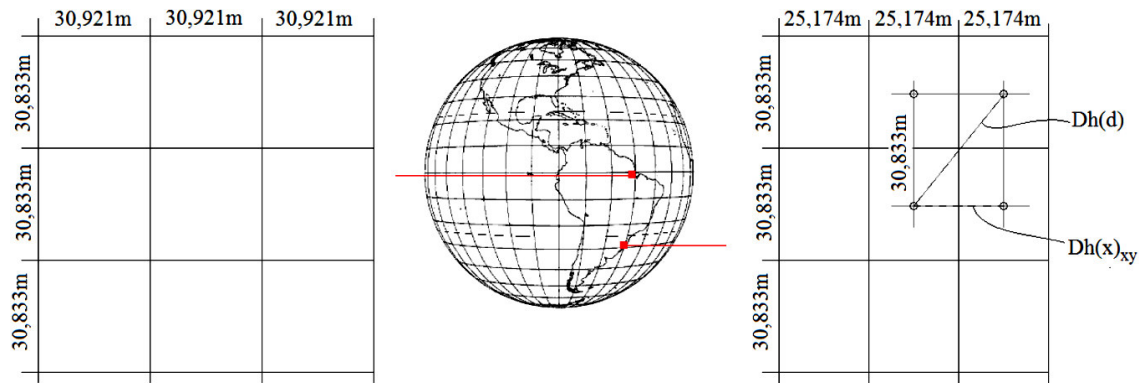


Figura 2. Alterações nas dimensões de células de 1" em diferentes latitudes. À esquerda, formato quase quadrado sobre o Equador. À direita, distâncias observadas na latitude de 32°, com o cálculo das distâncias diagonais ($Dh(d)$) em função da distância longitudinal ($Dh(x)_{xy}$) e da distância latitudinal, de 30,8333m.

A solução, adotada nas derivações do Topodata, consiste em operar as relações entre desníveis e as distâncias horizontais para cada direção de vizinhança, latitudinal, longitudinais e diagonais, previamente à integração das diferentes componentes da derivada de interesse. Naquele caso, foram criados planos de informação das distâncias longitudinais ($Dh(x)_{xy}$), que foram aplicados no cálculo das distâncias diagonais numa combinação com o valor constante da distância latitudinal, por sua vez inserida como escalar nos processamentos do algoritmo.

Podemos nos referir a este processo como derivação retangular. Ao simplificarmos a derivação com a adoção de distâncias iguais em x e y – derivação quadrada – de 30,833m, os desníveis no eixo E-W são confrontados com distâncias maiores do que aquelas que de fato ocorrem. No caso da declividade, significa uma subestimação dos resultados, visto que é calculada como o arco-tangente da razão do desnível pela distância. Na Figura 3, os resultados destes dois procedimentos estão apresentados para comparação na forma de classes de declividade. Observa-se que as feições relativamente mais planas (mais claras) produzidas pela derivação quadrada (B) se apresentam alargadas no eixo E-W, quando comparadas às suas correspondentes na derivação Topodata (A), sem alteração nas dimensões no sentido N-S. Antagonicamente, as feições de maior declividade (mais escuras) mostraram uma redução na largura também restrita ao eixo E-W. Entre os efeitos gerais, há uma ligeira mudança no equilíbrio territorial entre relevo suave e ondulado. Por fim, os resultados do mesmo cálculo, quando aplicado sobre os mesmos dados após sua projeção em sistema de coordenadas planas (UTM), mostram uma abundância de artefatos ocasionados pela redistribuição das cotas pela função de mapeamento aplicada no processo de projeção cartográfica (C).

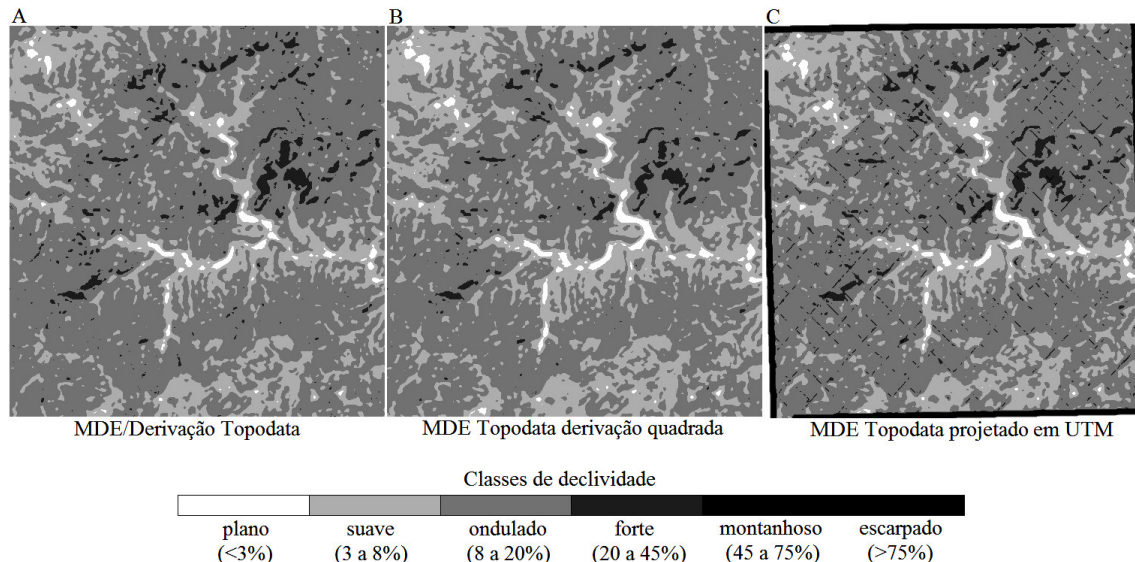


Figura 3. Classes de declividade resultantes do mesmo MDE com diferentes processamentos. Derivação retangular, com distâncias individualizadas (A); derivação no modo quadrado (B); e derivação após a projeção dos dados em coordenadas planas (C).

No presente estudo, a derivação quadrada foi aplicada com dimensões correspondentes à distância latitudinal, 30,833m. Portanto, os desvios observados neste trabalho se restringiram somente ao efeito de subestimação descrito, com exceção de alterações causadas pelo pós-processamento implicado no algoritmo. No caso de se adotarem outros valores de distância na mesma configuração quadrada (30m, por exemplo), deve-se considerar que haverá, como regra geral, uma subestimação das derivadas no sentido E-W, uma superestimativa no sentido N-S, ou ambos. Dessa forma, o efeito sobre a classificação se caracterizou como o rebaixamento para a classe imediatamente mais plana, segundo a ordem da legenda da Figura 3. Esta mudança de classe afetou 8,6% da área de estudo como um todo. Porém, em concordância com as observações acerca da Figura 3, as proporções afetadas variaram de acordo com as classes de orientação. Na Tabela 1 se observa que as vertentes orientadas dentro dos octantes E e W tiveram, respectivamente, 12,1% e 13,3% de sua área classificada em relevos mais planos, enquanto que aquelas dispostas nos octantes diagonais (NE, SE, SW e NW) apresentaram ainda em torno de 9% de sua área afetada. A expressão deste erro é

agravada pelo fato de que a redução de classes ocorre de maneira anisotrópica, sem qualquer condição de recuperar a informação por meio de ajustes e, portanto, de avaliar comparativamente áreas de orientações diferentes mesmo que sejam contíguas.

Tabela 1. Distribuição do efeito de subestimativa por classe de orientação de vertentes (%)

Efeito	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	Total
Nulo	95,7	90,8	87,9	91,4	96,1	90,6	86,7	91,4	91,4
Redução	4,3	9,2	12,1	8,6	3,9	9,4	13,3	8,6	8,6

Houve diferenças também na proporção territorial afetada entre as diferentes classes de declive, numa indicação de não-linearidade do efeito. Apesar das amplitudes crescentes dos intervalos de declividade entre as classes de relevo de plano para montanhoso, as classes mais íngremes tiveram maior porção de seus resultados afetados a ponto de mudar para a classe de declividade reduzida (Tabela 2). Esta não-linearidade pode ser explicada pela relação dos desvios com a função $1/\text{distância}$, implícita nas derivações, que, além das funções trigonométricas, garante por si uma maior sensibilidade nas classes de maior declividade.

Tabela 2. Distribuição do efeito de subestimativa por classe de relevo (%)

Efeito	Plano	Suave	Ondulado	Forte	Total
Nulo	100	97,3	90,7	36,0	91,4
Redução	0	2,7	9,3	64,0	8,6

Os valores numéricos absolutos de subestimação variaram até cerca de $2,8^\circ$, com máximos esparsos em torno de 4° . Ao se plotarem as diferenças relação à orientação de vertentes (φ), observa-se que as maiores subestimativas se concentram sistematicamente em torno das direções E e W, em contraposição com aquelas dispostas em torno das direções N e S (Figura 4-A). A transformação da orientação para o módulo de seu seno representa uma medida de sua projeção nas direções para leste ou para oeste (+1,0), com valores nulos para orientações N e S. A plotagem das diferenças de declividade em relação a esta variável (Figura 4-B) mostra uma relação de aumento da possibilidade de desvios com orientações E e W, sem indicar uma função propriamente dita, apesar de uma correlação observada (r) de 0,74. Os erros foram proporcionais à declividade, sobretudo nas vertentes E e W, em que se observou uma correlação de $r=0,98$ (Figura 4-C). Em termos relativos ao valor obtido sob derivação retangular (normalizados), estes desvios variaram de modo geral até cerca de 25%, embora os desvios extremos, de maneira excepcional, chegassem a mais de 50%. A correlação observada (r) das diferenças normalizadas em relação ao módulo do seno da orientação de vertentes foi de 0,92.

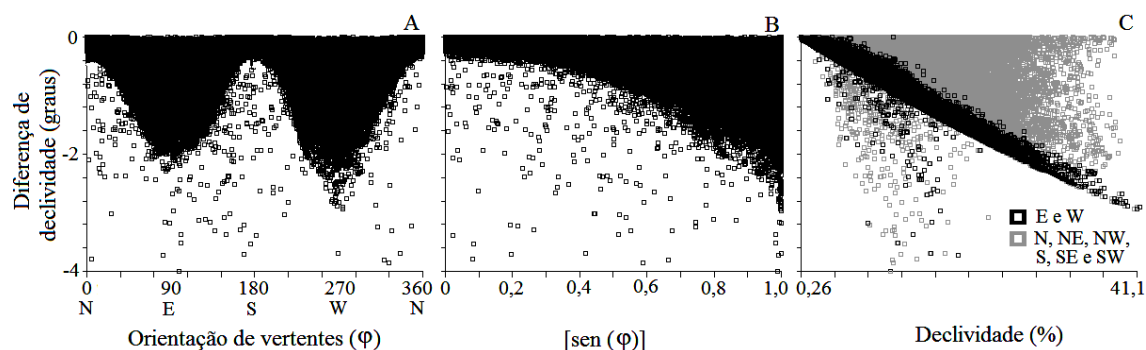


Figura 4. Distribuição dos desvios nos valores absolutos da declividade, em graus, entre a derivação quadrada e a derivação retangular em relação à orientação de vertentes, em relação ao módulo do seno da orientação de vertentes e à declividade.

A solução para áreas pequenas pode ser simplificada em relação àquela adotada no Topodata (Valeriano e Albuquerque, 2010), desde que a relação entre coordenadas geográficas e planas possa ser considerada constante na extensão analisada. Nesse caso, as distâncias latitudinais e longitudinais podem ser inseridas como escalares. Uma vez que se usem janelas de dimensões 3x3, as relações nas diagonais requerem a hipotenusa dessas componentes. Com janelas maiores, outras distâncias devem ser calculadas para as demais relações de vizinhança. As janelas móveis devem fazer separadamente operações restritas a cada direção de vizinhança para sua derivação pela distância correspondente e então as derivações direcionais podem ser integradas de acordo com o cálculo da variável. Caso a formulação da variável desejada permita, pode-se, ainda, embutir estas distâncias diretamente em na janela móvel, através da operação de seus coeficientes (Figura 1), individualmente, pelas suas respectivas distâncias.

Os resultados observados neste trabalho devem ser ponderados em função das condições escolhidas para o experimento. No caso, a área escolhida foi a localidade mais meridional dentre aquelas cobertas pelo Topodata que apresentasse terrenos mais íngremes, ao menos forte-ondulado. Em latitudes menores, os desvios, ou erros, advindos da derivação quadrada serão menores, embora não seja evidente outra solução quanto à resolução adequada em função das implicações geodésicas das mudanças de latitude que não leve ao uso de uma derivação retangular. Quanto a latitudes maiores, o problema apontado aumenta em taxas cada vez mais ampliadas, ao extremo de se tornarem perceptíveis na distorção característica que os mapas projetados exibem nas regiões polares. Grande parte das limitações relativas à resolução de MDE recai sobre as singularidades e feições caracterizadas por grandes variações na declividade. O que se busca em MDE de maior qualidade são características técnicas mais favoráveis de precisão/exatidão, acompanhadas de maior possibilidade de detalhamento. Portanto, erros advindos das metodologias de derivação que parecem aceitáveis em MDE mais generalizados, como SRTM e Topodata, podem comprometer o desempenho das análises justamente nos aspectos de maior interesse oferecidos pelas alternativas mais avançadas. Por fim, considerando que o detalhamento da escala é acompanhado de menores níveis de tolerância a erros, o uso de MDE detalhados só será justificado se for acompanhado de um aumento no rigor técnico dos procedimentos quanto à qualidade dos resultados.

Conclusões

O cálculo da declividade por derivação de MDE estruturado em coordenadas geográficas foi testado sob duas soluções para a determinação da componente horizontal. No procedimento de maior rigor se considera a relação entre as coordenadas geográficas e distâncias sobre o terreno em função da latitude, o que inclui a percepção de que as células (*pixels*) do MDE são retangulares. No procedimento mais simples, tratam-se estas distâncias em analogia com o conceito de resolução espacial na forma praticada com imagens orbitais, em que se consideram as células do MDE quadradas. Próximo ao extremo sul do Brasil, a relação entre as distâncias latitudinais e longitudinais corresponde a 25% de distorção em relação a um quadrado, o que leva a uma série de erros quando negligenciada nas derivações. Os desvios observados nos valores absolutos da declividade chegaram a 4°. Quando se normalizam esses erros com base nos resultados obtidos com derivação retangular, os desvios relativos variam até cerca de 25% em sua grande maioria, embora células esparsas atingissem proporções bem maiores. De modo geral, há uma relativa subestimação das derivadas nas vertentes orientadas E e W, ou superestimativas naquelas a N e a S, ou ambos efeitos. Nas primeiras, os erros chegaram a modificar a classe de declividade em até 13% de sua área. No cômputo total das mudanças de classe, observou-se que 8,6% de toda área foi afetada. A área relativa sujeita a mudança de classe de declividade foi tanto maior quanto mais íngreme fosse a classe considerada, com 64% da área em relevo forte classificado como ondulado.

Agradecimentos

Este integra o projeto CNPq coordenado pelo primeiro autor “Modelagem digital do terreno aplicado a estudos do meio físico”, n.º 305766/2011-2.

Referências

- Brasil. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Topodata: banco de dados geomorfométricos do Brasil**. Variáveis geomorfométricas locais. São José dos Campos, 2008. <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>>.
- Conrad, O. **SAGA – program structure and current state of implementation**. In: Böhner, J., McCloy, K.R., Strobl, J. [Eds.]: SAGA – Analysis and Modelling Applications. Göttinger Geographische Abhandlungen, Vol.115, 130pp. Chapter 4, p. 39-52, 2006. Disponível em: <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/index.jsp>.
- ERSDAC (Earth Remote Sensing Data Analysis Center). **ASTER GDEM**. 2009.
- Glenna, N. F., Streutkera, D. R., Chadwickb, D. J., Thackrayb, G. D., Dorsch, S. J. Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. **Geomorphology**, v. 73, n. 1–2, p. 131–148, 2006.
- Gowdie, A. **Geomorphological techniques**. Allen and Unwin, London, pp. 395. 1981.
- Hagget, P.; Chorley, R. J.; Stoddart, D. R. Scale standards in geographical research: a new measure of areal magnitude. **Nature**, n. 205, p. 844-847, 1965.
- Lejot, J., Delacourt, C., Piégay, H., Fournier, T., Trémélo, M.-L., Allemand, P. Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 32, p. 1705–1725, 2007.
- Lindsay, J.B. **The Whitebox Geospatial Analysis Tools project and open-access GIS**, Proceedings of the GIS Research UK 22nd Annual Conference, The University of Glasgow, 16-18 April, 2014.
- Miceli, B. S., Dias, F. M., Seabra, F. M., Santos, P. R. A., Fernandes, M. C. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia** v. 63, n.1, p.191-201, 2011.
- Moore, I. D., Lewis, A., Gallant, J. C., **Terrain attributes: estimation methods and scale effects**. In: Modelling change in environmental systems. Jakeman, A. J.; Beck, M. B.; McAleer, M. J. John Wiley e Sons Ltd. (Ed.), Chichester (Eng.). 584p. Chapter 8, p.189-214, 1993.
- Rabus, B.; Eineder, M.; Roth, R.; Bamler, R. The Shuttle Radar Topography Mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, p. 241-262, 2003.
- Rodriguez-Cassola, M., Baumgartner, S. V., Krieger, G., Moreira, A. Bistatic TerraSAR-X/F-SAR spaceborne–airborne experiment: Description, data processing and results. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 48, n. 2, p.781–794, 2010.
- Valeriano, M. M. . **Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-15318-RPE/818). 72p., 2008.
- Valeriano, M. M. ; Rossetti, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, p.300-309, 2012.
- Valeriano, M. M.; Albuquerque, P. C. G. **Topodata: processamento dos dados SRTM**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-16702-RPQ/854). 79p., 2010.