

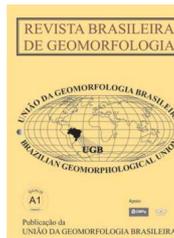


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 17, nº 4 (2016)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i4.1063>



ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO APLICADA À CARTOGRAFIA GEOMORFOLÓGICA DA PORÇÃO CENTRAL DA SERRA DO MAR PARANAENSE

DIGITAL TERRAIN ANALYSIS APPLIED TO GEOMORPHOLOGICAL CARTOGRAPHY IN THE PARANÁ COASTAL MOUNTAIN RANGE (SERRA DO MAR)

Ricardo Michael Pinheiro Silveira

*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná
Rua Cel. Francisco H. dos Santos s/n, Curitiba, Paraná. CEP: 81531980. Brasil
Email: ricardomichaelps@gmail.com*

Claudinei Tabora da Silveira

*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná
Rua Cel. Francisco H. dos Santos s/n, Curitiba, Paraná. CEP: 81531980. Brasil
Email: claudineits@ufpr.br*

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):
13/04/2016
Aceito (Accepted):
03/06/2016

Palavras-chave:

Modelo Digital do Terreno;
Geomorfometria; Mapeamento
Geomorfológico.

Keywords:

Digital Terrain Model;
Geomorphometry;
Geomorphological Mapping.

Resumo:

No contexto da análise digital do relevo como subsídio à modelagem geomorfológica, o presente trabalho tem como objetivo aplicar uma classificação geomorfométrica parametrizada a partir de Modelo Digital do Terreno (MDT) e atributos topográficos para mapear formas de relevo e formas de vertente num recorte localizado na Serra do Mar, Estado do Paraná, Brasil. O MDT, interpolado a partir de dados vetoriais planialtimétricos na escala 1:25.000, possui célula de 15x15 metros. Foram calculados sete atributos topográficos: declividade, plano de curvatura, perfil de curvatura, relevo sombreado, acumulação de fluxo, índice topográfico de umidade e índice de posição topográfica. As regras de classificação automatizada para os mapas de formas de relevo e formas de vertente foram definidas considerando duas abordagens: a) discretização dos atributos topográficos por critérios estatísticos (média e desvio padrão) para variáveis que apresentam valores relativos a uma área específica; b) discretização por critérios determinísticos para variáveis cujos valores podem ser aplicados em áreas distintas. O mapa de formas de relevo resultou na identificação de cinco formas de relevo principais (planície, rampas coluvionares, calhas de drenagem, vertentes e cristas) fragmentadas em outras oito adicionais, subdivididas em classes com distintas características geomorfométricas. O mapa contemplou as principais segmentações morfológicas da área de estudo, com poucos ruídos na classificação. Para o mapa de formas de vertente foram obtidas

27 classes. Devido ao nível de detalhamento, as formas de vertente se mostraram mais sensíveis à qualidade e à escala do modelo. Em campo constatou-se o potencial de aplicação das classificações geomorfométricas automatizadas a partir de MDT para levantamentos geomorfológicos preliminares, condizente com as principais rupturas observadas na paisagem e com baixo custo operacional. Conclui-se que, para a eficácia da classificação resultante, alguns tópicos requerem atenção: a escala da base de dados, o tamanho de célula do MDT, o cálculo dos atributos topográficos, o tamanho da janela móvel para cálculos de vizinhança e os parâmetros das regras de classificação.

Abstract:

In the context of digital terrain analysis as a basis to the geomorphological modeling, this study aims to employ a parametric geomorphometric classification considering the Digital Terrain Model (DTM) and topographic attributes to map landforms and slope segments located in the Serra do Mar mountain range, state of Paraná, Brazil. The DTM, interpolated from the planialtimetric vector data at 1:25.000 scale, has a 15x15 meters pixel. Seven topographic attributes were calculated: slope, plan curvature, profile curvature, hillshade, flow accumulation, topographic wetness index and topographic position index. The rules for automated classification of the landforms and of the slope segments maps were defined taking into account two approaches: a) discretization of topographic attributes by statistical criteria (mean and standard deviation) for variables with values related to a specific area; b) discretization by deterministic criteria for variables with values which can be applied to different areas. The map of landforms resulted in the identification of five main forms (plain, colluvial ramps, channels, slopes and ridges) fragmented into eight others, subdivided into classes with distinct geomorphometric characteristics. The map included the main morphological segmentations of the study's area, with little biases in the classification. For the slope segments map, 27 classes were obtained. Due to the level of detail, slope segments were more subject to the quality and scale of the model. In the field, the potential for applying the automated geomorphometric classifications considering the DTM to preliminary geomorphological surveys was found. It is consistent with the major cracks observed in the landscape and a low operating cost. It was concluded that, to the effectiveness of the resulting classification, some topics demand attention: the scale of the database, the DEM cell size, the calculation of topographic attributes, the mobile window size for neighborhood calculations and classification rules parameters.

1. Introdução

A modelagem geomorfológica, amparada pela disponibilidade cada vez maior de Modelos Digitais do Terreno (MDT) e capacidade otimizada de processamento em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), configura um cenário favorável para a crescente aplicação da análise digital do relevo como suporte na construção de diversos mapeamentos temáticos. Dentre eles, destacam-se: mapas geomorfológicos, mapas hidrológicos, mapas geotécnicos, mapas de suscetibilidade a processos geoambientais, mapas de solos (pedometria), compartimentação e evolução de paisagens e muitas outras aplicações.

A geomorfometria, definida como a ciência da análise quantitativa da superfície terrestre (PIKE, 2000), tem como enfoque a extração de medidas descritivas

(parâmetros) e feições da superfície terrestre (objetos) (MARK e SMITH, 2004; WILSON, 2012). Evans (1972) define a primeira, que trata a superfície de modo contínuo, como geomorfometria geral, e a segunda, que contempla a discretização da superfície, como geomorfometria específica. O presente trabalho contempla as duas abordagens.

Conforme Minar e Evans (2008), a análise digital do relevo tem como grande desafio suprir a falta de precisão e objetividade dos mapeamentos geomorfológicos tradicionais. Entretanto, destaca-se que as classificações automatizadas de formas de relevo quase sempre representam uma tentativa de replicar algum sistema previamente concebido de classificação e mapeamento manual de formas de relevo. Muitos desses sistemas manuais consideram modelos semânticos que tentam contemplar conceitos considerados importantes pelo

pesquisador utilizando a formulação de critérios subjetivos para a diferenciação de classes (MACMILLAN e SHARY, 2009).

Nesse contexto, a descrição numérica da geometria da superfície, associada à relação entre topografia, processo e forma, possibilita a criação de um conjunto consistente de regras para a delimitação de unidades do relevo (ROMSTAD, 2001).

Para Mihai (2012), os métodos supervisionados de classificação geomorfométrica requerem o conhecimento prévio dos processos e feições da área de estudo para a definição dos limiares dos atributos topográficos (calculados a partir dos MDTs) que podem ser utilizados para a delimitação de unidades do relevo. Por outro lado, os métodos não-supervisionados de classificação geomorfométrica são baseados na abordagem estatística com a finalidade de encontrar a menor área geomorfométrica homogênea.

Dehn *et al.* (2001) citam que as formas de relevo são descritas principalmente sob duas perspectivas: baseado unicamente na sua geometria ou baseado nas semânticas usadas para expressar e capturar modelos conceituais mentais subjetivos. As dificuldades semânticas de definir precisamente, por exemplo, os limites de uma montanha ou de vales associados foram discutidos por Mark e Smith (2004) e Smith e Mark (2006), que destacaram a imprecisão em áreas de transição de unidades conceituadas com nomenclaturas específicas.

Referente à complexidade associada à caracterização determinística de formas de relevo e outras unidades/entidades geomorfológicas, Bishop *et al.* (2012) sinalizam cinco dificuldades principais: a) estabelecimento de esquemas taxonômicos compreensivos; b) mapeamento geomorfológico em diferentes escalas; c) caracterização de limites indeterminados e áreas de transição; d) estabelecimento de critérios aplicados universalmente; e) obtenção de resultados reproduzíveis.

Diversos autores apontam as vantagens da classificação geomorfológica digital apoiada por técnicas geomorfométricas (DIKAU *et al.*, 1991; WOOD, 1996; MACMILLAN *et al.*, 2000; WILSON e GALLANT, 2000; ROMSTAD, 2001; VALERIANO, 2004; DRAGUT e BLASCHKE, 2006; IWAHASHI e PIKE, 2007; KLINGSEISEN *et al.*, 2007; GROHMANN *et al.*, 2008; PIKE *et al.*, 2009; SAADAT *et al.*, 2008; WILSON, 2012; SILVEIRA *et al.*, 2014), sobretudo em função da redução da subjetividade na classificação manual,

facilidade na comparação dos resultados derivados de diferentes conjuntos de dados e da redução do tempo de delimitação das unidades ou feições individualizadas.

Nesse cenário, o presente trabalho tem como objetivo aplicar uma classificação geomorfométrica, a partir de MDT e atributos topográficos, num recorte localizado na porção central da Serra do Mar Paranaense. A classificação que resultou nos mapas de formas de relevo e formas de vertente teve como referência a hierarquia taxonômica de Ross (1992), adotada pelo mapeamento geomorfológico do estado do Paraná (SANTOS *et al.*, 2006; OKA-FIORI, 2006).

1.1 Caracterização da área de estudo

O recorte definido como área de estudo (figura 1) está localizado na porção leste do Estado do Paraná e compreende quatro cartas topográficas na escala 1:25.000. Abrange parcialmente quatro municípios paranaenses: Morretes, Guaratuba, Paranaguá e, numa pequena porção a sudeste, Matinhos, totalizando área de 686,2 km². Em aspectos geomorfológicos o recorte está inserido no contexto da Serra do Mar e da Planície Litorânea, cujo gradiente de 1493 metros confere uma variada gama de feições e processos atuantes na paisagem.

Conforme o mapeamento geomorfológico do estado do Paraná (SANTOS *et al.*, 2006; OKA-FIORI *et al.*, 2006), em ordem geomorfológica escalar crescente, referente ao 1º nível taxonômico (unidades morfoestruturais), a área de estudo compreende o Cinturão Orogênico do Atlântico. Esta unidade está associada às derradeiras colisões de placas e soerguimento de cadeias montanhosas, cujos corpos dão suporte a grandes setores da Serra do Mar (morfoescultura correspondente ao 2º nível taxonômico), e também abrange a categoria das Bacias Sedimentares Cenozóicas, representada pela morfoescultura denominada Planície Litorânea (2º táxon).

As duas unidades morfoesculturais compreendem quatro subunidades morfoesculturais (3º táxon): a) Serra do Mar Paranaense, cujas formas predominantes são topos alongados e em cristas com vertentes retilíneas e vales em “V” encaixado. A direção geral da morfologia varia entre NE-SW, N-S e NW-SE, modelada em litologias da Suíte Álcali-Granitos e do Complexo Gnáissico Migmatítico; b) Rampas de Pré-Serra e Serras Isoladas, com predomínio de topos alongados em crista e rampas

dissecadas com vertentes retilíneas e vales em “V”, modeladas em rochas da Suíte Álcali-Granitos e do Complexo Gnáissico Migmatítico; c) Blocos Soerguidos da Serra do Mar, que mantém as características desses dois primeiros com o acréscimo da dissecação muito alta; d) Planície Litorânea e Planícies Flúvio-Marinhas, cujas formas predominantes são as planícies de restinga e flúvio-marinhas, terraços arenosos, dunas e praias, modeladas em sedimentos marinhos e flúvio-marinhos.

Além disso, destaca-se que a área de estudo

contempla uma das regiões mais atingidas pelos movimentos de massa ocorridos no dia 11 de março de 2011, caracterizando-se como um evento de grandes proporções que acarretou severas modificações na paisagem e muitos danos para a população local. Devido à intensidade do evento, a região ainda encontra-se instável e suscetível ao desprendimento e remobilização de material. Nesse sentido, a adoção da área de estudo está associada à diversidade morfológica, à dinâmica recente e ao conhecimento prévio do recorte.

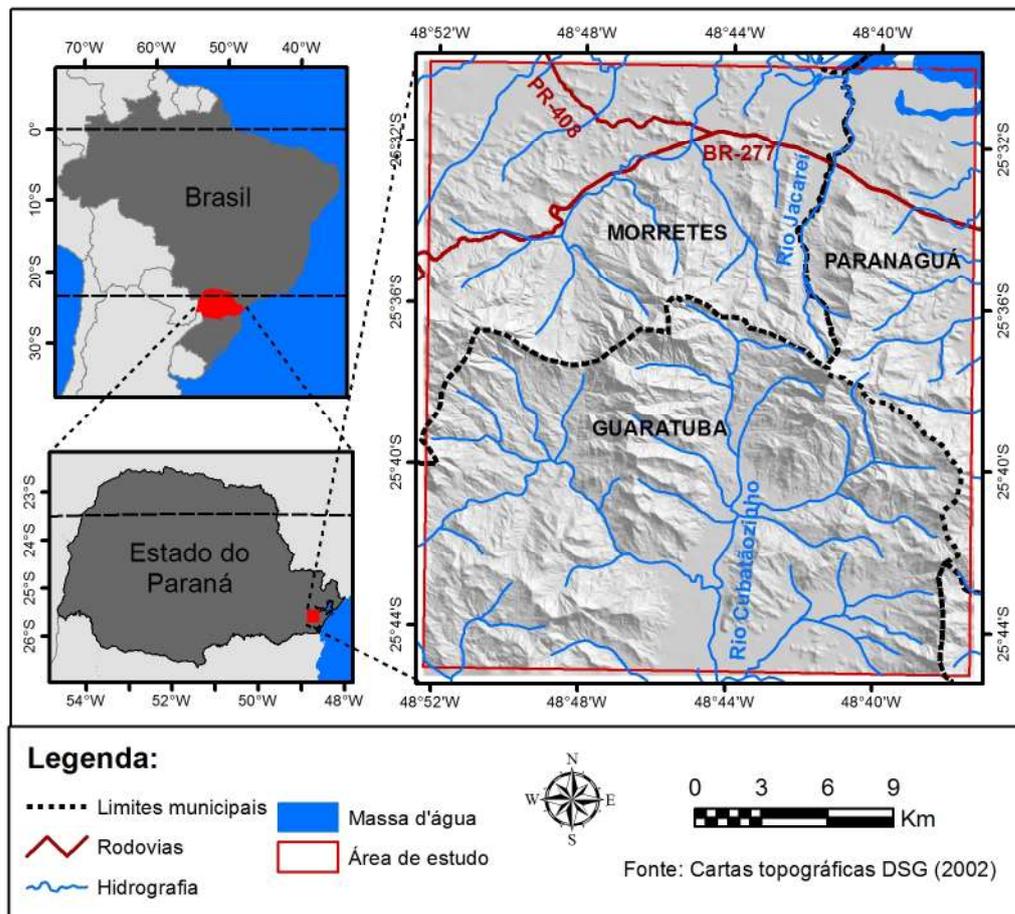


Figura 1 - Localização da área de estudo.

2. Materiais e métodos

A elaboração dos mapas de formas de relevo e formas de vertente foi dividida em duas etapas: a) modelagem e caracterização geomorfométrica; b) definição das regras de classificação geomorfológica. Os trabalhos de campo (concentrados na bacia hidrográfica do rio Jacaré) balizaram o mapeamento tanto nas etapas prévias, com a definição das principais feições identificadas na área de estudo, quanto na conferência posterior, *in loco*, das classificações obtidas.

A figura 2 evidencia, de modo esquemático, as etapas metodológicas sintetizadas. Todos os procedimentos operacionais em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas foram realizados com auxílio do *software ArcGIS 10.1*.

2.1 Modelo Digital do Terreno e atributos topográficos

O Modelo Digital do Terreno foi gerado com base no método de interpolação denominado *Topogrid*, baseado na proposta de Hutchinson (1988), a partir

de dados planialtimétricos vetoriais (curvas de nível, pontos cotados e hidrografia), obtidos das cartas topográficas 2858-1 NE, 2858-1 SE, 2858-2 NO, 2858-2 SO,

na escala 1:25.000, do Programa Proteção da Floresta Atlântica - Paraná (PRÓ-ATLÂNTICA), elaborado pela Diretoria de Serviço Geográfico (DSG, 2002).

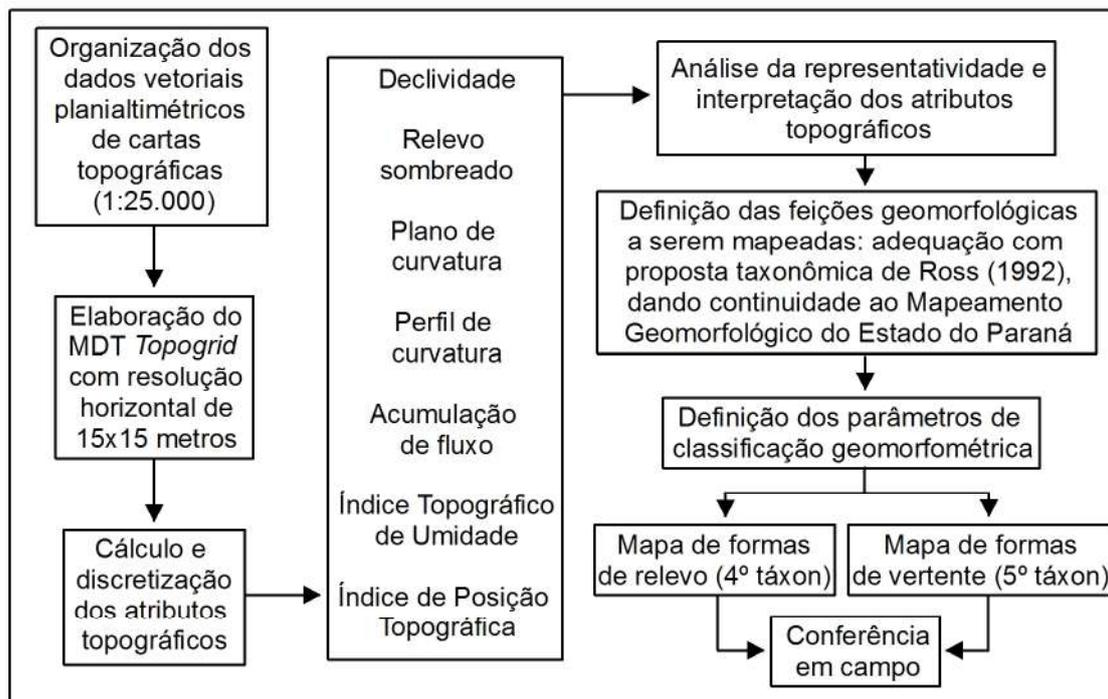


Figura 2 - Fluxograma metodológico simplificado.

A etapa de definição da célula (resolução horizontal ou *pixel*) do MDT foi pautada em contribuições de Hengl (2006), considerando as características topográficas locais e complexidade do terreno. Nessa proposta, a resolução horizontal do MDT pode ser estimada numa relação entre as curvas de nível e área, sendo:

$$p = \frac{A}{2 \cdot \sum l} \quad (\text{Equação 1})$$

onde p é o tamanho do pixel, A é a área total e $\sum l$ é o somatório do comprimento de todas as curvas de nível do recorte avaliado.

A aplicação desta equação resultou num valor de 16,3 metros, sendo este o tamanho de célula recomendado para a área de estudo considerando as características topográficas locais. Com base nesse parâmetro, o MDT foi interpolado com células de 15x15 metros (valor arredondado), totalizando uma grade de 1671x1875 células para o recorte estudado.

A partir do MDT foram calculados sete atributos topográficos: declividade e relevo sombreado, confor-

me variáveis direcionais de Horn (1981); plano e perfil de curvatura (ZEVENBERGEN e THORNE, 1987); acumulação de fluxo, utilizando o algoritmo D-Infinity de Tarboton (1997); Índice Topográfico de Umidade (BEVEN e KIRKBY, 1979) e Índice de Posição Topográfica (WEISS, 2001) – além da altimetria, que é o próprio MDT. Com exceção do IPT, todos os demais atributos foram calculados a partir de janelas móveis de vizinhança 3x3 células.

O Índice de Posição Topográfica (IPT), proposto por Weiss (2001), é derivado de um algoritmo que mensura a diferença entre a elevação de um ponto central (Z_0) e a média da elevação (\bar{Z}) ao seu redor com um raio predeterminado (R), conforme ilustra a figura 3. Wilson e Gallant (2000, p. 74), apresentando a mesma equação, definem o cálculo como Diferença da Elevação Média:

$$IPT = Z_0 - \bar{Z} \quad (\text{equação 2})$$

Os valores positivos obtidos pelo IPT representam locais que são mais elevados que a média do seu

entorno, caracterizando, por exemplo, as cristas. Os valores negativos, por sua vez, representam os locais mais rebaixados em relação à sua vizinhança, caracte-

terizando vales ou depressões. Já os valores próximos a zero obtidos pelo IPT representam as superfícies de declive constante, destacando-se as áreas planas.

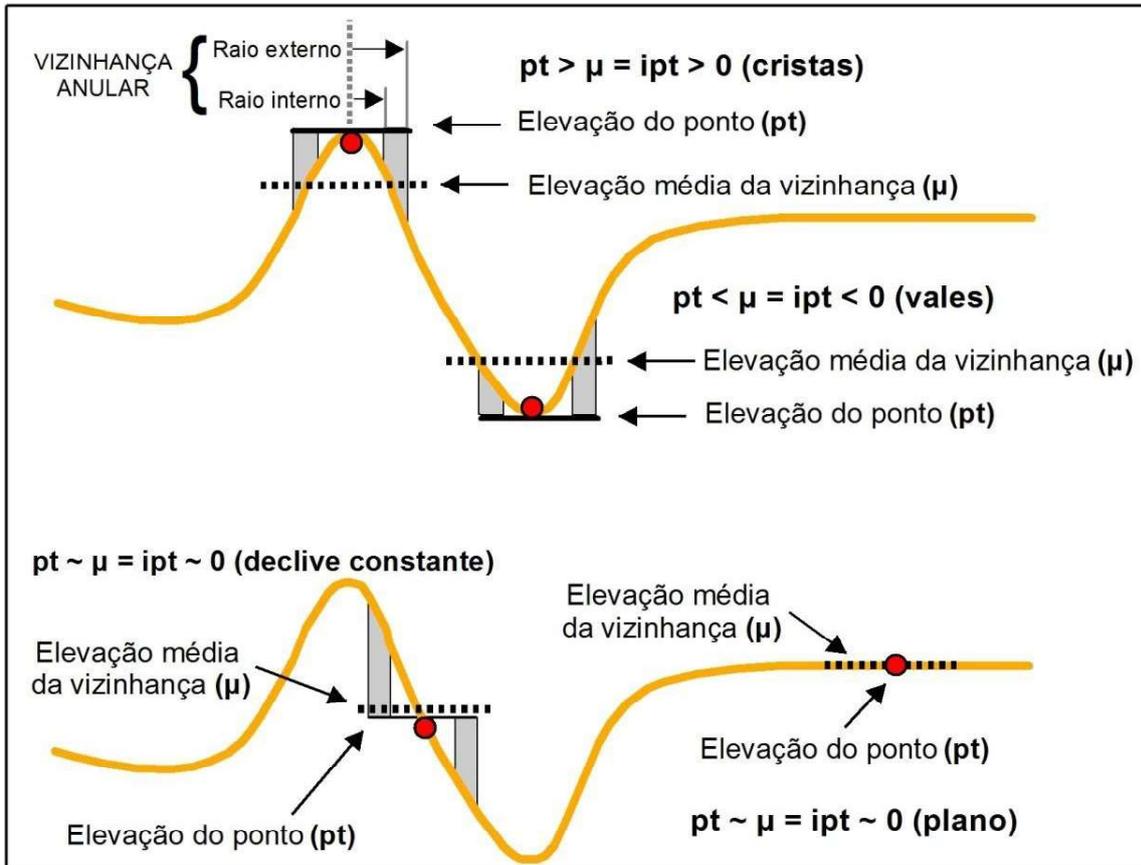


Figura 3 - Índice de Posição Topográfica. Fonte: Adaptado de Weiss (2001).

Como o IPT é diretamente afetado pelo fator de escala, os valores resultantes do índice (e, consequentemente, as classificações derivadas), variam de acordo com os valores de raio adotados. A etapa de definição do raio de análise da vizinhança, portanto, conforme apontam Tagil e Jenness (2008) e De Reu *et al.* (2013), deve estar associada ao nível de detalhe pretendido pelo pesquisador.

2.1. Classificação geomorfométrica de formas de relevo e vertente

A partir do MDT e dos sete atributos topográficos derivados, os parâmetros adotados para a classificação geomorfológica, incluindo as formas de relevo, referentes ao 4º táxon, e as formas de vertente, associadas ao 5º táxon, conforme proposição de Ross (1992), foram determinados considerando a representatividade dos

atributos topográficos, ou seja, os limiares que melhor representam as rupturas do relevo em relação às feições observadas na paisagem.

Após a fase inicial de definição das classes a serem mapeadas, em campo, as regras de classificação automatizada foram definidas considerando duas abordagens: a) discretização dos atributos topográficos por critérios estatísticos (média e desvio padrão) para variáveis que apresentam valores relativos a uma área específica, como acumulação de fluxo, e valores que variam em função do fator de escala, como o IPT; b) discretização por critérios determinísticos para variáveis cujos valores podem ser aplicados em áreas distintas, como declividade e hipsometria.

Para o mapa de unidades de relevo foram definidas 13 classes detalhadas derivadas da combinação de atributos topográficos particionados pelo processo

de álgebra de mapas (tabela 1). Foram utilizadas as seguintes variáveis: hipsometria, declividade, plano de curvatura, acumulação de fluxo, ITU e IPT.

Para hipsometria, declividade e plano de curvatura os parâmetros foram definidos por critérios determinísticos, considerando o conhecimento da área em campo

e contribuições de trabalhos anteriores, como Silveira *et al.* (2013). Já para acumulação de fluxo, ITU e IPT, cujos valores são dependentes do fator de escala e também do contexto geomorfológico local, os parâmetros seguiram critérios estatísticos (média e desvio padrão), visando a replicação da proposta.

Tabela 1: Parâmetros do mapa de formas de relevo.

FORMAS DE RELEVO	PARÂMETROS
Planície fluviomarinha e planícies fluviais	Hipsometria < 20m; Declividade < 6%; ITU > Média
Depósitos alúvio-coluvionares recentes reentalhados	Hipsometria > 20m; Declividade > 6%; Plano de curvatura: < -0,1
Rampas coluvionares de vertente	IPT > -1 e < 0,5 desvio padrão; Hipsometria > 20m
Rampas coluvionares em vales rebaixados	IPT < -1 desvio padrão; Hipsometria < 100m
Rampas coluvionares em vales elevados	IPT < -1 desvio padrão; Hipsometria > 100m
Calha de drenagem de planície	Acum. Fluxo > 0,1 desvio padrão; Hipsometria < 20m; Declividade < 6%
Calha de drenagem de vertente	Acum. Fluxo > 0,1 desvio padrão; Hipsometria > 20m; Declividade > 6%
Vertentes intermediárias	Hipsometria entre 20 e 400m
Vertentes elevadas	Hipsometria > 400m
Cristas e topos convexos em morros	IPT < 0,5 desvio padrão; Hipsometria < 300m; Declividade média do entorno (21x21 pixels) < 40%; Unidade Rampas de Pré-Serra e Serras Isoladas (3º táxon)
Cristas e topos aguçados em morros	IPT < 0,5 desvio padrão; Hipsometria < 300m; Declividade média do entorno (21x21 pixels) > 40%; Unidade Rampas de Pré-Serra e Serras Isoladas (3º táxon)
Cristas e topos convexos em serras	IPT < 1 desvio padrão; Declividade média do entorno (21x21 pixels) < 40%.
Cristas e topos aguçados em montanhas	IPT < 1 desvio padrão; Declividade média do entorno (21x21 pixels) > 40%.

O mapa de formas de vertente foi resultado da combinação entre plano e perfil de curvatura (figura 4), representando nove formas elementares (DIKAU, 1989; MACMILLAN e SHARY, 2009). Adicionalmente acrescentou-se a declividade para indicar a inclinação destes segmentos de vertente, cujas combinações totalizam 27 classes. Para este mapa, os parâmetros foram definidos por critérios determinísticos.

Tabela 2: Parâmetros do mapa de formas de vertente.

Plano de curvatura	Parâmetros	Perfil de curvatura	Parâmetros	Declividade
Segmentos convergentes	< -0,1	Segmentos convexos	< -0,1	0 a 6%
Segmentos planares	> -0,1 e < 0,1	Segmentos retilíneos	> -0,1 e < 0,1	6 a 40%
Segmentos divergentes	> 0,1	Segmentos côncavos	> 0,1	> 40%

3. Resultados e discussões

3.1 Mapa de formas de relevo

O mapa de formas de relevo (figura 5) resultou na identificação de cinco formas de relevo principais (planície, rampas coluvionares, calhas de drenagem, vertentes e cristas) fragmentadas em outras oito adicionais, subdivididas em classes com distintas caracte-

rísticas geomorfométricas. A classificação contemplou as principais segmentações morfológicas da área de estudo, com poucos ruídos na classificação.

Conforme ilustrado pela figura 6, cujos limites são ilustrativos e cujo rio Jacareí encontra-se centralizado na

fotografia, as classes de formas de relevo identificadas se mostraram adequadas tanto em termos de diversidade das feições características presentes na área de estudo quanto de representatividade adequada à escala pretendida, indicando a fragmentação das subunidades morfoesculturais.

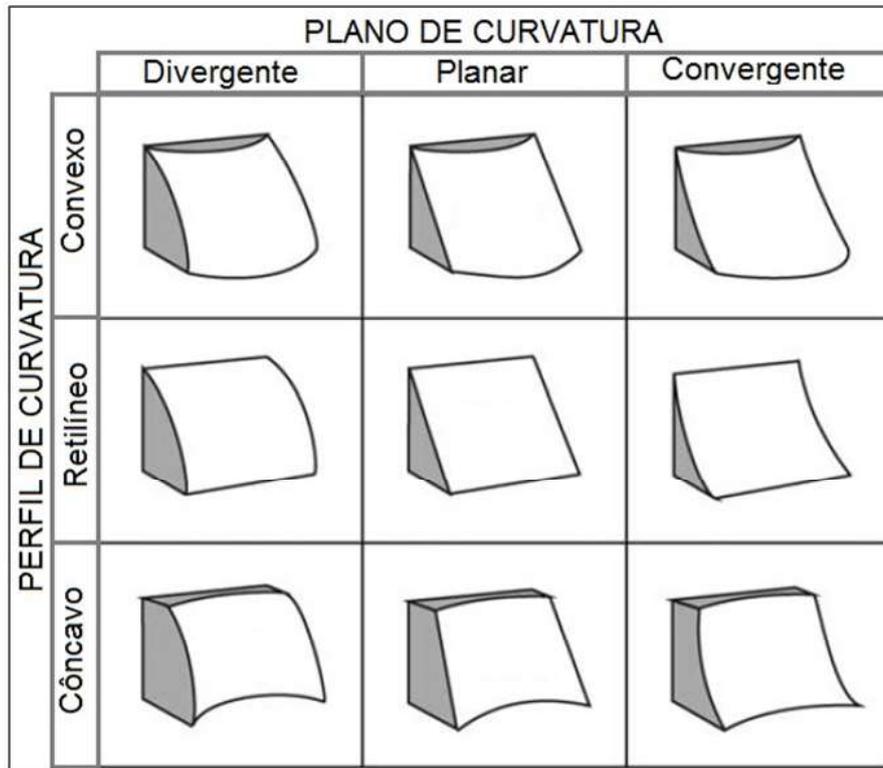


Figura 4 - Segmentos de vertente em plano e perfil de curvatura. Fonte: Adaptado de Dikau (1989).

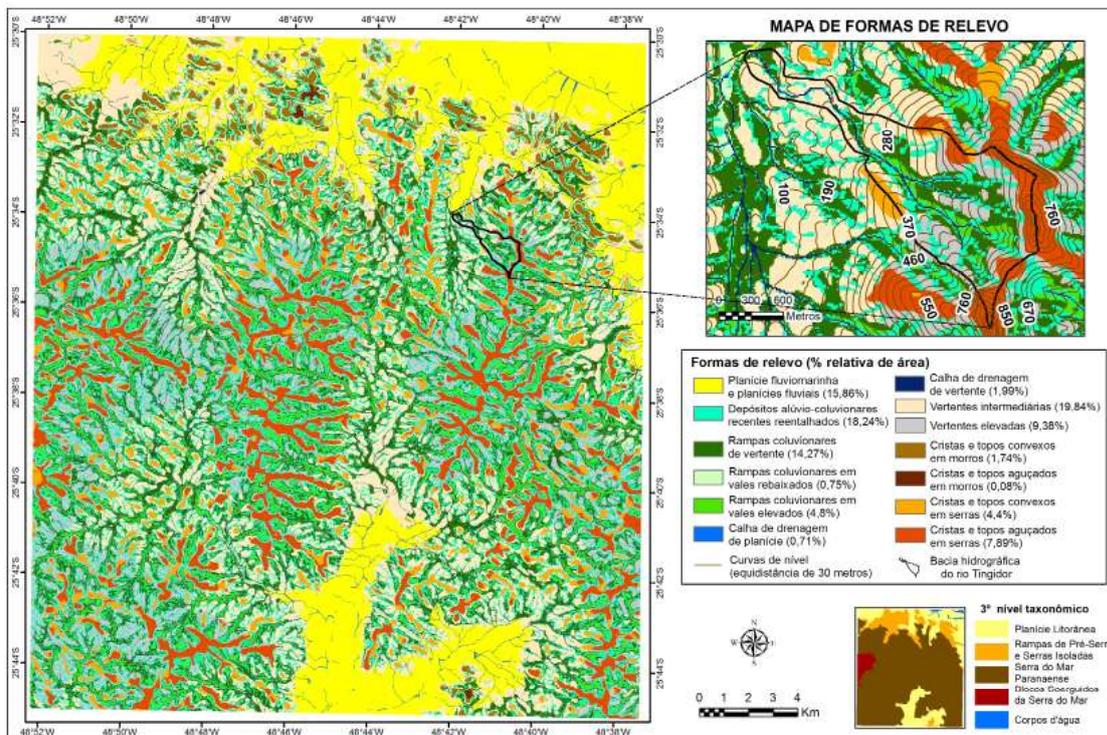


Figura 5 - Mapa de formas de relevo.

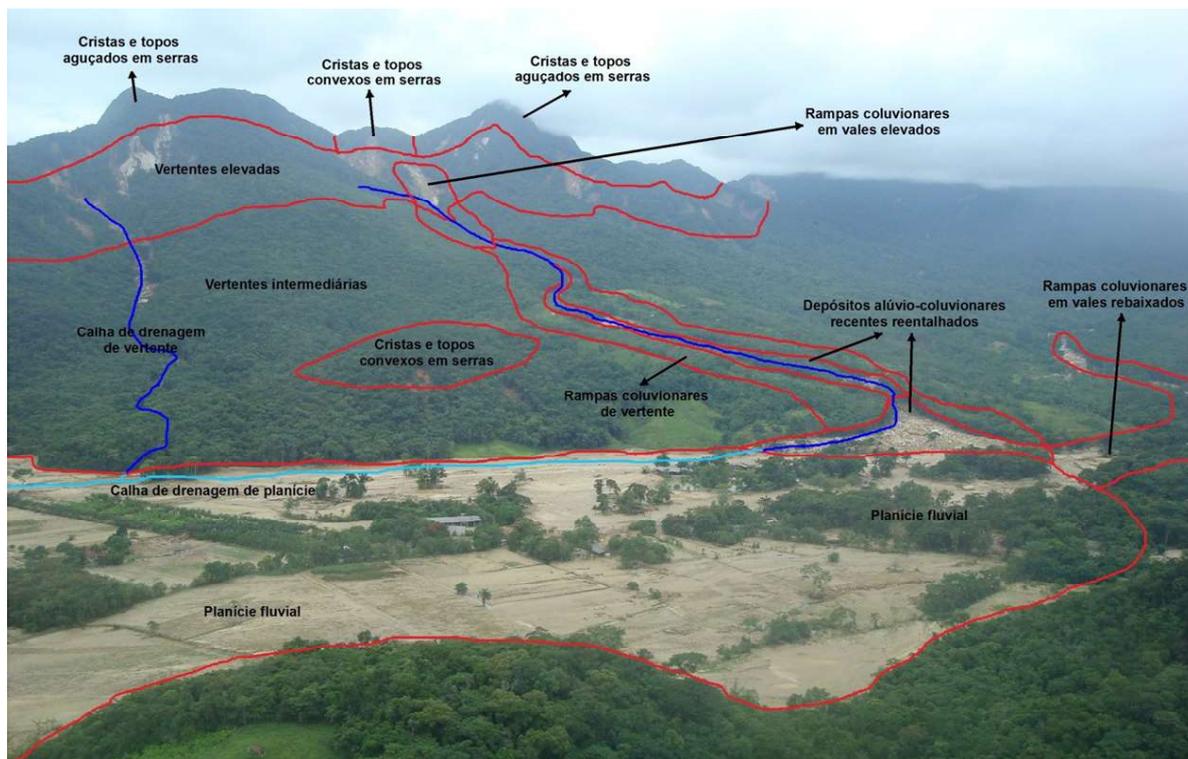


Figura 6 - Representação aproximada da delimitação das formas de relevo.

A figura 7 trás onze exemplos de fotografias espacializadas na bacia hidrográfica do rio Jacareí, local onde se concentraram as etapas de conferência em campo. Em todos os casos, seja na planície ou nos topos da serra, as feições mapeadas pela classificação foram facilmente observadas *in loco*, principalmente as cristas (figura 7E), as vertentes (terço médio e terço superior da Serra do Mar, com forte controle estrutural, bem evidenciado pela figura 7F) e a planície (figura 7C, 7F e 7H). As calhas de drenagem de vertente (figura 7K) também foram representadas de modo fidedigno, evidenciando a aplicabilidade do MDT *Topogrid* utilizado, ainda que muitos segmentos tenham apresentado descontinuidades, sobretudo na planície, cujo fluxo acumulado dessas áreas é menor que nas vertentes devido à baixa variação de declividade (figura 7I).

Comparativamente, a figura 8 retrata a classificação em perspectiva, com exagero vertical (figura 8A), e uma fotografia registrada aproximadamente do mesmo ponto de observação (figura 8B), destacando a semelhança entre o modelo e a realidade, com muitas feições discerníveis. Um ponto positivo ilustrado pela figura é o mapeamento das cicatrizes de movimentos de massa como rampas coluvionares ou depósitos alúvio-coluvionares, classes que observadas a longas

distâncias não são passíveis de visualização uma vez que a vegetação oculte cicatrizes de eventos antigos.

Em campo constatou-se o potencial de aplicação da classificação para levantamentos geomorfológicos preliminares, condizente com as principais rupturas observadas na paisagem, embora as limitações desse modelo se atenham sobretudo na definição dos limites e áreas de transição: onde termina uma crista e onde se inicia uma rampa coluvionar, por exemplo.

Essa constatação reforça uma questão central da análise digital do relevo aplicada ao mapeamento de formas de relevo: a relação interdependente entre a geometria e a topologia, entre o quantitativo e o qualitativo, entre o mensurável e o subjetivo. Referente à imprecisão dos limites obtidos pela classificação, destaca-se que essa é uma problemática que emerge da percepção conceitual qualitativa e inevitavelmente acaba sendo transposta para as etapas de atribuição de parâmetros que visam a representação de descontinuidades topográficas. Nesse sentido, denota-se que o mapeamento automatizado reduz a subjetividade em aspectos operacionais, visando a reprodutibilidade e padronização metodológica, embora o intermédio com as definições qualitativas (conceituais e semânticas) da geomorfologia ainda mantenha parte da subjetividade do mapeamento.

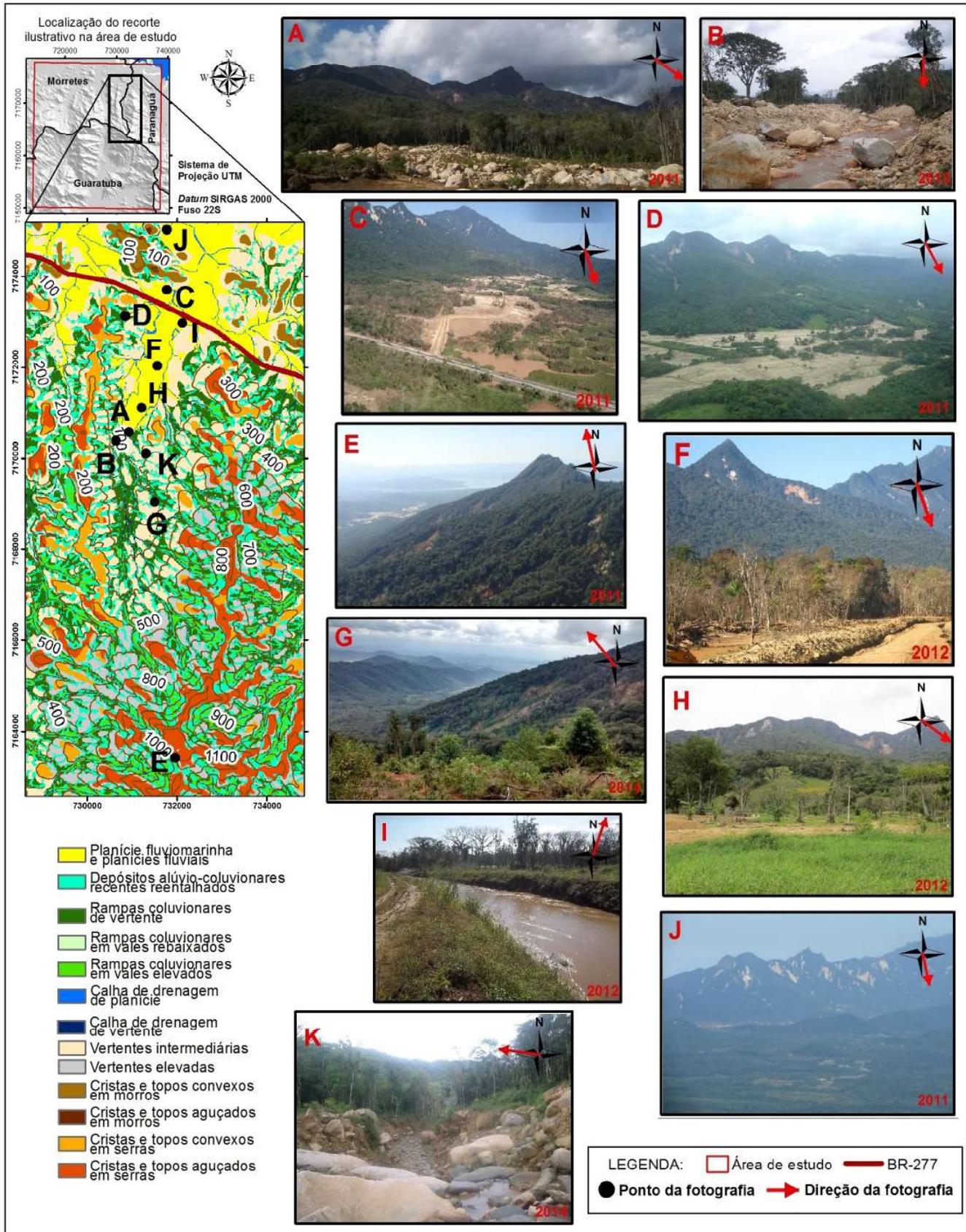


Figura 7 - Fotografias georreferenciadas no mapa de formas de relevo.

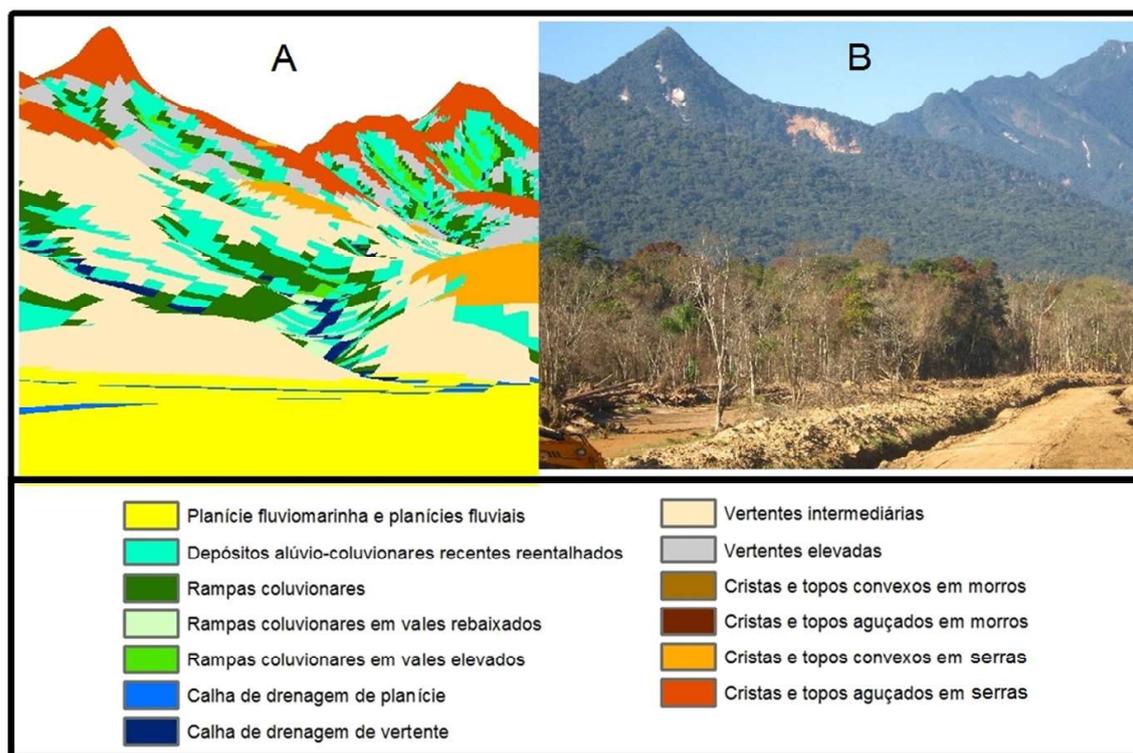


Figura 8 - Comparação aproximada entre o mapa de formas de relevo e a realidade de campo

Exemplo disso, no trabalho, foi a separação entre cristas e topos de serras das cristas e topos de morros, uma vez que em muitos casos as propriedades morfométricas destas duas unidades são semelhantes e a própria qualificação descritiva é imprecisa. Comumente a literatura aponta que morros são elevações que variam de 100 até 300 metros de altitude, entretanto muitas elevações secundárias com essas características são encontradas nas porções intermediárias da Serra do Mar. Daí a necessidade de acrescentar a delimitação do 3º táxon do mapeamento geomorfológico do estado do Paraná como regra de classificação, pois em casos específicos, ligados a aspectos genéticos, apenas a morfometria pode não ser capaz de distinguir formas com origens variadas.

Ademais, independentemente da distinção genética, os morros isolados localizados sobretudo à norte da área de estudo foram todos mapeados adequadamente em contraste ao declive constante da planície. Para essa segmentação de grandes unidades geomorfológicas o IPT foi o atributo topográfico que apresentou os melhores resultados.

Mapa de formas de vertente

Para o mapa de formas de vertente foram obtidas 27 classes (figura 9). Devido ao nível de detalhamento, as formas de vertente se mostraram mais sensíveis à

qualidade e à escala do modelo. Assim, a análise dos resultados obtidos considera tanto a equidistância das curvas de nível (10 metros) da base cartográfica utilizada como referência para a interpolação do MDT quanto a janela local de vizinhança (3x3) para o cálculo do plano e perfil de curvatura e da declividade.

O mapa deste nível identificou segmentos predominantes de vertente condizentes à escala 1:25.000 que localmente podem apresentar variações não mapeadas pela limitação dos dados de entrada.

Devido à sensibilidade da modelagem observada para esta classificação, a alteração de parâmetros, por menores que sejam, desde as etapas iniciais de elaboração do MDT até as regras de classificação, afeta diretamente o produto final. Se, por um lado, o rigor metodológico deve ser priorizado com ainda mais ênfase, de outro as dificuldades relacionadas à conferência em campo e atribuições qualitativas aumentam proporcionalmente às possibilidades de critérios adotados na classificação ao nível pretendido de semidetalhe, chegando aos segmentos de vertente.

Pelo fato desta classificação considerar segmentos predominantes de vertente, em campo algumas feições são mais facilmente identificadas que outras. A figura 7K, por exemplo, indica a calha do rio Tingidor

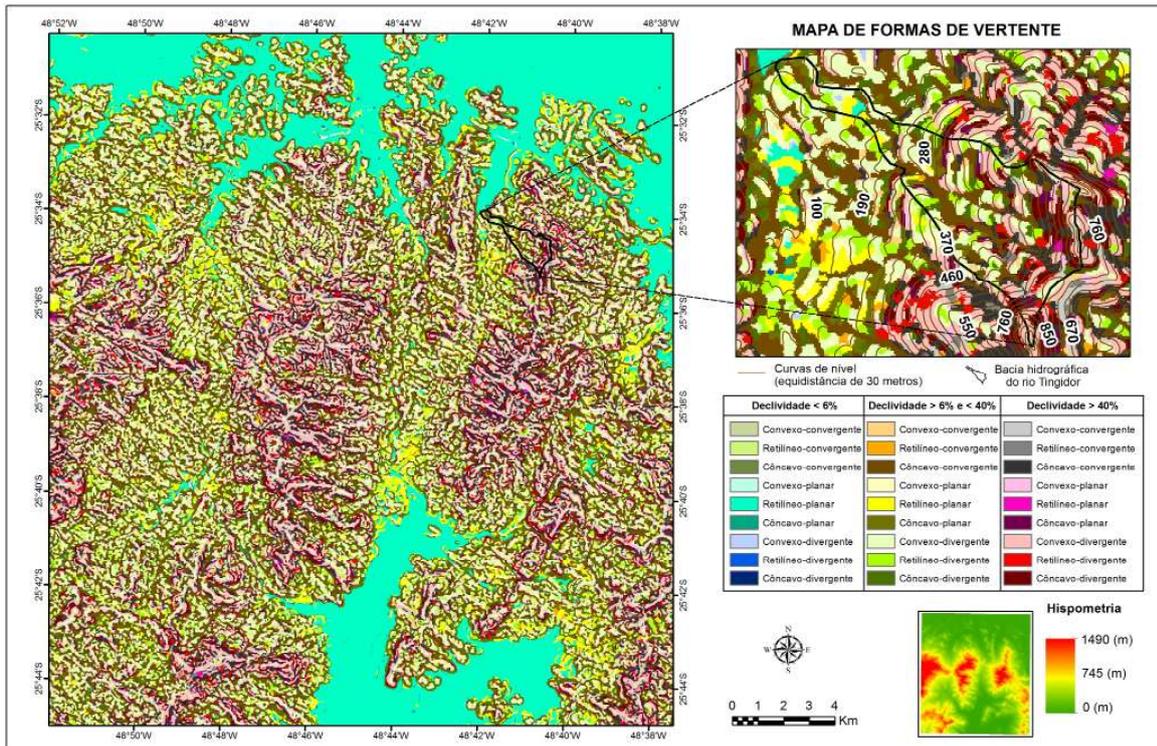


Figura 9 - Mapa de formas de vertente.

(fotografia tomada de jusante a montante) mapeada precisamente como segmento côncavo-convergente em toda sua extensão. Oportunamente ressalta-se um aspecto interessante das classificações: embora a base cartográfica utilizada para interpolação do MDT seja de 2002 e os eventos de movimentos de massa tenham ocorrido em 2011, com drásticas mudanças na paisagem local, os modelos indicaram as formas características de relevo que influem na dinâmica dos processos atuantes.

A classe de maior representatividade na área de estudo foi o segmento retilíneo-planar, com declividade inferior a 6%, ilustrado pela figura 7C. Dentre as limitações desta classificação, além da adequação paramétrica, destacam-se a miscelânea de informações, as dificuldades de representação em escala compatível e a subjetividade da validação e/ou conferência *in loco*. Quanto às potencialidades, destaca-se a possibilidade de integração de variáveis adicionais voltadas para aplicações específicas, principalmente a aspectos morfodinâmicos.

Destaca-se, também, a dificuldade em estabelecer relações hierárquicas das feições mapeadas entre os níveis taxonômicos. No Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná, os três níveis taxonômicos mapeados representam uma hierarquia: o “Cinturão Orogênico do Atlântico” (1º táxon, unidade morfoestrutural), por

exemplo, é constituído pelas unidades morfoesculturais “Serra do Mar” e “Primeiro Planalto” (2º táxon) e estes, na área de estudo, são fragmentados entre outras 10 subunidades morfoesculturais (3º táxon). Entretanto, nos mapeamentos propostos para esse recorte da Serra do Mar, por exemplo, não seria possível agrupar cicatrizes de deslizamento em uma única classe de forma de vertente. As formas de vertente, por sua vez, também não configuram com exatidão os limites das classes do mapa de formas de relevo. E estes, por fim, não têm agrupamento específico definido para caracterizar o 3º táxon do mapeamento utilizado como referência.

4. Conclusão

A aplicação das propostas de classificações geomorfológicas automatizadas a partir de MDT e atributos topográficos derivados evidenciou, como pontos positivos, a possibilidade de realizar levantamentos geomorfológicos preliminares com baixo custo operacional e representatividade na paisagem desde que considerada a importância do rigor metodológico para a eficácia da classificação resultante.

Os atributos topográficos que melhor representaram a segmentação geomorfológica da área de estudo foram a declividade, o plano e perfil de curvatura e o

índice de posição topográfica. As curvaturas tiveram maior variação conforme a mudança do tamanho de célula do MDT, portanto sua aplicação está condicionada ao fator de escala.

Quanto aos pontos negativos, ressalta-se que: a) não foi possível estabelecer relação hierárquica taxonômica direta entre as unidades mapeadas, ou seja, tanto o mapa de formas de relevo quanto o de formas de vertente são classificações independentes; b) os produtos finais não configuram mapas geomorfológicos, pois se limitam a aspectos ligados à morfometria e morfografia, não contemplando, diretamente, a morfogênese e morfocronologia, elementos básicos constituintes de um mapa geomorfológico.

Nessa perspectiva, reforça-se que o objetivo da classificação deve condizer com alguns tópicos fundamentais que determinam a aplicabilidade do produto final: a escala da base de dados, o tamanho de célula do MDT, o cálculo dos atributos topográficos, o tamanho da janela móvel para cálculos de vizinhança e as regras de classificação parametrizada. Embora a proposta tenha demonstrado potencial para identificar feições geomorfológicas que auxiliam a construção de mapas geomorfológicos, sua aplicação é dependente de parâmetros mutuamente compatíveis e da inclusão de outros atributos topográficos e critérios de particionamento e discretização dos mesmos.

O trabalho denotou, também, a necessidade de adaptação dos mapeamentos geomorfológicos tradicionais, documentos complexos e com extensas legendas, no contexto dos SIGs e das geotecnologias, cujas ferramentas possibilitam o processamento, armazenamento e integração de inúmeras variáveis numa plataforma sistematizada. A representação das classificações obtidas foi uma grande dificuldade do trabalho em função do elevado número de classes para um único produto cartográfico utilizando apenas a variável cor.

Embora os resultados evidenciem a tentativa de dar continuidade aos trabalhos de cartografia geomorfológica do estado do Paraná numa pequena área amostral, este trabalho tem caráter introdutório e metodológico, ainda com muitas lacunas para aplicações posteriores e trabalhos futuros na temática da análise digital do relevo que podem subsidiar a construção de mapas geomorfológicos sistematizados para recortes maiores.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES, pelas bolsas de mestrado e doutorado, e ao Laboratório de Pesquisas Aplicadas em Geomorfologia e Geotecnologias (LA-GEO/UFPR), pelo suporte durante a realização do trabalho.

6. Referências Bibliográficas

- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J., A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin** 24 (1), 43–69, 1979.
- BISHOP, M. P.; JAMES, L. A.; SHRODER, J. F.; WALSH, S. J. Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: Concepts, issues and research. **Geomorphology** 137, p. 5–26, 2012.
- DE REU, J.; BOURGEOISA, J.; BATSA, M.; ZWERTVAEGHERB, A.; GELORINIB, V.; SMEDTC, P.; CHUE, W.; ANTROPD, M.; MAEYERD, P.; FINKEB, P.; MEIRVENNEC, M.; VERNIERSB, J.; CROMBÉA, P. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. **Geomorphology**, n. 186, p. 39–49, 2013.
- DEHN, M.; GÄRTNER, H.; DIKAU, R. Principals of semantic modeling of landform structures. **Computers & Geosciences** 27, 1011–1013, 2001.
- DIKAU, R. The application of a digital relief model to landform analysis. In: RAPER, J. F. (Ed.), **Three Dimensional Applications in Geographical Information Systems**. Taylor & Francis, London, pp. 51–77, 1989.
- DIKAU, R.; BRABB, E. E.; MARK, R. M. **Landform Classification of New Mexico by Computer**. Open File report 91-634. U.S. Geological Survey, 1991.
- DRAGUT, L.; BLASCHKE, T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. **Geomorphology**, 81, 330–344, 2006.
- DSG - Diretoria do Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. **Cartas Topográficas**: folhas 2858-1 NE; 2858-1 SE; 2858-2 NO; e 2858-2 SO. DSG, 2002.
- EVANS, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: CHORLEY, R. J. (Ed.). **Spatial analysis in geomorphology**. London: Harper & Row, Publishers, 1972.

- GROHMANN, C. H.; SAWAKUCHI, A. O. Influence of cell size on volume calculation using digital terrain models: A case of coastal dune fields. **Geomorphology** 180–181, p. 130–136, 2013.
- HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers & Geosciences** 32, 1283–1298, 2006.
- HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. **Proceedings of the IEEE**, n. 69, v.01, p. 14–47, 1981.
- HUTCHINSON, M. F. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. **Paper presented at Third International Symposium on Spatial Data Handling at Sydney**, Australia, 1988.
- IWAHASHI, J.; PIKE, R. J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. **Geomorphology** 86(3-4): 409–440, 2007.
- KLINGSEISEN, B.; METTERNICHT, G.; PAULUS, G. Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. **Environmental Modelling & Software** xx, p. 1–13, 2007.
- MACMILLAN, R. A.; PETTAPIECE, W. W.; NOLAN, S. C.; GODDARD, T. W. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. **Fuzzy Sets and Systems** 113, 81–109, 2000.
- MACMILLAN, R. A.; SHARY, P. A. Landform and landform elements in geomorphometry. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 227–254, 2009.
- MACMILLAN, R. A.; SHARY, P. A. Landform and landform elements in geomorphometry. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 227–254, 2009.
- MARK, D. M., SMITH, B. A science of topography: from qualitative ontology to digital representations. In: Bishop, M.P., Shroder, J.F. (Eds.), **Geographic Information Science and Mountain Geomorphology**. Springer–Praxis, Chichester, England, pp. 75–97, 2004.
- MIHAI, N. Geomorphometric techniques for landform analysis for pedologic characterization of terrain. **Annals of the University of Craiova – Agriculture, Montanology, Cadastre Series**. Vol. XLII-2012/1, p. 454–460, 2012.
- MINÁR, J.; EVANS, I. S. Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. **Geomorphology** 95 (3–4), 236–259, 2008.
- OKA-FIORI, C., SANTOS, L.J.C., CANALI, N.E., FIORI, A.P., SILVEIRA, C.T., SILVA, J.M.F., ROSS, J.L.S. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná**: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000. Curitiba, MINEROPAR, 2006.
- PIKE, R. J. Geomorphometry — diversity in quantitative surface analysis. **Progress in Physical Geography** 24 (1), 1–20, 2000.
- PIKE, R. J.; EVANS, I., HENGL, T. Geomorphometry: A Brief Guide. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 3–30, 2009.
- ROMSTAD, B. Improving relief classification with contextual merging. **Proceedings of ScanGIS'2001** — The 8th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science. Ås, Norway, p. 3–13, 2001.
- ROSS, J. S. Registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. **Rev. Geografia**. São Paulo, IG-USP, 1992.
- SAADAT, H.; BONNELL, R.; SHARIFI, F.; MEHUYS, G.; NAMDAR, M.; ALE-EBRAHIM, S. Landform classification from a digital elevation model and satellite imagery. **Geomorphology** 100, p. 453–464, 2008.
- SANTOS, L.J.C.; OKA-FIORI, C.; CANALI, N.E.; FIORI, A.P.; SILVEIRA, C.T.; SILVA, J.M.F.; ROSS, J.L.S. Mapeamento geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. Ano 7, nº2, p. 3–12, 2006.
- SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; FERREIRA, A. M.; GÓIS, J.R.; MIO, G.; Silveira, R. M. P.; MASSULINI, N. E. B.; LEONARDI, T. M. H. Emprego de atributos topográficos no mapeamento da susceptibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacaré/Paraná. **Sociedade & Natureza (UFU. Online)**, v. 24, p. 623–639, 2013.
- SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C. Emprego de técnicas de inferência espacial para identificação de unidades de relevo apoiado em atributos topográficos e árvore de decisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, nº 1, 87–101, 2014.
- SMITH, B.; MARK, D. M. Do mountains exist? Towards an ontology of landforms. **Environment and Planning B: Planning and Design** 30 (3), 411–427, 2006.
- TAGIL, S.; JENNESS, J. GIS-Based Automated Landform Classification and Topographic, Landcover and Geologic Attributes of Landforms Around the Yazoren Polje, Turkey.

- Journal of Applied Sciences** 8 (6), p. 910-921, 2008.
- TARBOTON, D. G. A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models. **Water Resources Research**, **33(2)**: 309-319, 1997
- VALERIANO, M.M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, p. 1-72, 2004.
- WEISS, A. **Topographic Position and Landforms Analysis**. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA, 2001.
- WILSON, J. P. Digital terrain modelling. **Geomorphology**, 137, p.107–121, 2012.
- WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (eds.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: John Wiley & Sons, p.1-27, 2000.
- WOOD, J. **The geomorphological characterisation of digital elevation models**. PhD Thesis - University of Leicester. Disponível em: <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd>. Leicester, UK, 185p., 1996.
- ZEVENBERGEN, L. W.; THORNE, C. R. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. **Earth Surface Processes and Landforms**, v.12, p.47-56, 1987.