



# Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: [www.ufpe.br/rbgfe](http://www.ufpe.br/rbgfe)



## Classificação hierárquica automatizada de formas do relevo no estado do Paraná apoiada na modelagem digital do terreno

Ricardo Michael Pinheiro Silveira<sup>1</sup>, Claudinei Taborda da Silveira<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia / UFPR, Curitiba-PR. Autor correspondente. [ricardomichael@ufpr.br](mailto:ricardomichael@ufpr.br)

<sup>2</sup> Professor do Departamento de Geografia / UFPR, Curitiba-PR. [claudineits@ufpr.br](mailto:claudineits@ufpr.br)

Artigo submetido em 10/01/2015 e aceite em 20/12/2015

### RESUMO

Na perspectiva da modelagem digital do terreno aplicada à identificação e mapeamento de feições e unidades morfológicas, pautada no desenvolvimento da geomorfometria e das geotecnologias em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas, o presente trabalho emprega a aplicação da proposta de classificação hierárquica de formas do relevo de Hammond (1964), adaptada para o ambiente informatizado por Dikau (1991). A área de estudo adotada compreende o estado do Paraná, Brasil. O método consiste num sistema de classificação em três níveis hierárquicos resultante da combinação de três variáveis morfométricas (declividade, gradiente altimétrico e predomínio de áreas planas) calculados a partir de uma janela móvel definida e que resultam em até 96 classes distintas de relevo. Tendo como referência o Modelo Digital de Elevação (MDE) SRTM90, três janelas amostrais foram testadas: 9,63x9,63km, 4,77x4,77km e 2,43x2,43km. Os resultados apontaram que os parâmetros de entrada, como a resolução espacial do MDE, tamanho da área amostral e variáveis morfométricas utilizadas, afetam diretamente o produto final, sendo necessário embasar a escolha dos mesmos em relação aos objetivos do mapeamento, ao fator de escala da base de dados e à taxonomia do relevo. O nível de detalhamento/generalização das classificações obtidas também evidenciou que as atribuições qualitativas (nomenclatura das classes) variam conforme as características geomorfológicas locais. Destaca-se, ainda, a potencialidade da classificação em distinguir e representar unidades morfológicas por níveis de dissecação do relevo. A proposta automatizada mostrou-se uma alternativa viável para suporte de apoio em trabalhos de cartografia geomorfológica. Cabe destacar que a inclusão de outros conjuntos de variáveis, modificação de parâmetros e aplicação em recortes específicos de estudo emerge como desafio para trabalhos posteriores.

Palavras-chave: Geomorfometria; Mapeamento Geomorfológico; MDE SRTM90.

## Automated hierarchical classification of landforms in the state of Paraná supported by digital terrain modeling

### ABSTRACT

From the perspective of digital terrain modeling applied to the identification and mapping of features and morphological units, based on the development of geomorphometrics and geotechnology in the environment of Geographic Information Systems, this paper employs the application of the proposed hierarchical classification of landforms Hammond (1964) adapted by Dikau (1991) to computerized environment. The study areas encompassed the state of Paraná, Brazil. The method consists of a system of classification into three hierarchical levels resulting from the combination of three morphometric variables (slope, relief and profile type) calculated from a defined moving window and which results in up to 96 different relief classes. With reference to the Digital Elevation Model (DEM) SRTM90 three sample windows were tested: 9.63x9.63km, 4.77x4.77km and 2.43x2.43km. The results showed that the input parameters, the spatial resolution of the DEM, the size of sampling area and the morphometric variables used directly affect the final product. It is therefore necessary to base the selection of the same in relation to the mapping objectives, the scaling factor database and landform taxonomy. The level of detail/generalization of the classifications obtained also showed that the qualitative attributes (nomenclature of classes) vary according to local geomorphological characteristics. Furthermore, we highlight the potential of classification to distinguish and represent morphological units by level of dissection of relief. The automated proposal proved to be a viable alternative to support work in

geomorphological mapping. It is worth noting that the inclusion of other sets of variables, parameter modification and application in specific frameworks of study emerges as a challenge for further work.

Key words: Geomorphometry; Geomorphological Mapping; DEM SRTM90.

## Introdução

O desenvolvimento das geotecnologias nas últimas décadas, inseridas no contexto da análise digital do relevo em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), configura um cenário favorável para a aplicação de técnicas paramétricas que objetivam a mensuração, identificação e classificação de feições e unidades do relevo a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDEs), que podem contribuir significativamente e dar suporte em trabalhos de cartografia geomorfológica.

A geomorfometria, definida como a ciência da análise quantitativa da superfície terrestre (Pike, 1995; 2000), tem como enfoque a extração de medidas descritivas (parâmetros) e feições da superfície (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. Sobre a temática, destacam-se obras abrangentes de Wilson e Gallant (2000); Hengl e Reuter (2009).

Embora a geomorfometria seja um ramo tradicional da geomorfologia, o advento da informática potencializou seu emprego recente fomentada pela evolução de *softwares* e *hardwares*, nas geotecnologias pelo desenvolvimento de sensores de coleta de dados topográficos, favorecendo sua aplicação em diversas áreas do conhecimento, como hidrologia, ecologia, meteorologia, e também mapeamentos de solos (Burrough et al., 1997; Mcbratney, 2003; Möller et al., 2012; Silveira et al., 2013a), de suscetibilidade a processos geoambientais (Iwahashi et al., 2001; Silveira et al., 2013b; Meyer et al., 2014) e de unidades morfológicas do relevo.

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).

Diversos autores apontam as vantagens da classificação geomorfológica digital (Macmillan et al., 2000; Romstad, 2001; Dragut e Blaschke, 2006), 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.

Algumas das propostas que obtiveram destaque na identificação de feições e unidades do relevo foram os trabalhos de Wood (1996), Weiss (2001), Iwahashi e Pike (2007), com desdobramentos e novas aplicações em Bolongaro-Crevenna et al. (2005); Dragut e Blaschke (2006); Dikau (1991), com aplicações realizadas por Brabyn (1998), Gallant et al. (2005), Hrvatin e Perko (2009); Barka et al. (2011).

Com a utilização crescente de MDEs, muitos mapas geomorfológicos “clássicos” passaram a ser utilizados para validar formas de relevo derivadas em ambiente informatizado. O conhecimento heurístico, assim, pode ser convertido em regras de cálculos matemáticos que tornam possível a derivação de mapas da superfície terrestre por qualquer usuário final de modo automático ou semiautomático (Seijmonsbergen et al., 2011).

Conforme Minar e Evans (2008), a modelagem digital do relevo tem como grande desafio suprir a falta de precisão e objetividade dos mapeamentos geomorfológicos tradicionais.

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 convencionais 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, com o objetivo de identificar unidades morfológicas do relevo no estado do Paraná, de modo automatizado e a partir de técnicas geomorfológicas, o presente trabalho aplica a proposição metodológica de Dikau (1991) que se apoia na classificação hierárquica de formas do relevo de Hammond (1964).

Em estudo recente, Tinós et al. (2014) aplicaram esta proposta de classificação automática na região do planalto de Poços de Caldas, localizado entre os limites dos estados de São Paulo e Minas Gerais, destacando a potencialidade da proposta para mapeamento adequados à escala 1:100.000. No entanto, cabe destacar que aplicações dessa e outras técnicas (semi)automatizadas de classificação, suas adaptações à realidades regional e local, bem como a avaliação das potencialidade e limites no

emprego classificatório ainda são lacunas a serem preenchidas na pesquisa geomorfológica brasileira, que tem potencial de contribuição.

Estado da arte da cartografia geomorfológica do estado do Paraná

Os estudos pioneiros sobre o relevo paranaense datam da década de 1940, com as contribuições Maack (1981), que propôs a primeira divisão do estado em grandes unidades naturais: Litoral, Serra do Mar, Primeiro, Segundo e Terceiro Planalto (figura 1).

Décadas posteriores, o primeiro trabalho de cartografia geomorfológica sistemática para o Paraná, cujos resultados foram publicados por Santos *et al.* (2006) e Oka-Fiori *et al.* (2007), seguiu o método de taxonomia do relevo proposto por Ross (1992) e, conforme a escala adotada (1:250.000), atingiu o nível de representação dos três primeiros táxons.

O 1º táxon, denominado de unidades morfoestruturais, é representado pelo Cinturão Orogênico do Atlântico, pela Bacia Sedimentar do Paraná e pelas Bacias Sedimentares Cenozóicas e Depressões Tectônicas. Já o 2º táxon, que compreende as unidades morfoesculturais, é representado pela Serra do Mar e Morros Isolados, os três Planaltos Paranaenses e Planícies contidas em cada uma das unidades morfoestruturais, sendo a compartimentação desse nível taxonômico a que mais se aproxima da divisão proposta por Maack na década de 1940. Quanto ao 3º táxon, o último nível abordado no trabalho, o mapeamento identificou cinquenta unidades morfológicas, denotando a heterogeneidade do relevo paranaense.

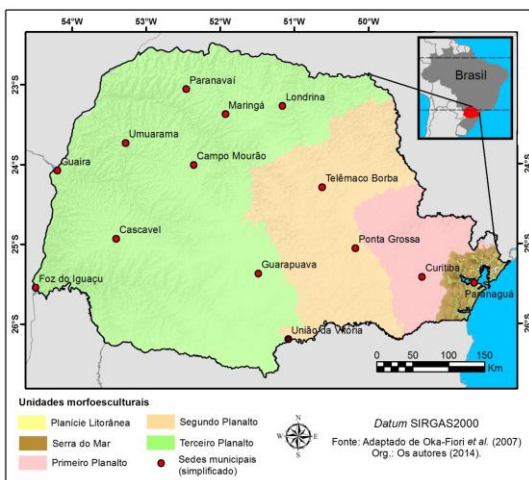


Figura 1. Localização da área de estudo e unidades morfoesculturais.

**Materiais e métodos**

A classificação manual de formas do relevo proposta por Hammond (1964), discutida, adaptada e aplicada em ambiente informatizado por Dikau (1991; 1995) e posteriormente automatizada em ambiente SIG por Reuter (2009), consiste num sistema de classificação em três níveis hierárquicos resultante da combinação de atributos topográficos calculados a partir de uma janela móvel definida.

Para cada posição da janela, os três atributos utilizados foram: a) declividade, com a porcentagem relativa de áreas definidas por um valor limítrofe de declive; b) gradiente altimétrico, que expressa a diferença entre a elevação máxima e a mínima; c) predomínio de áreas planas, com a porcentagem relativa de áreas planas ou declives suaves, conforme o valor limítrofe da declividade, que ocorrem nas porções altas e baixas do relevo, com base no valor mediano do gradiente altimétrico.

O cálculo da declividade (equação 1, 2 e 3) seguiu algoritmo proposto por Horn (1981), que considera as variáveis direcionais das células de uma janela 3x3 (Figura 2).

$$Declividade = \sqrt{(Dx)^2 + (Dy)^2} \quad (eq. 1)$$

$$Dx = [(Zc + 2Zf + Zi) - (Za + 2Zd + Zg)]/8\Delta x \quad (eq. 2)$$

$$Dy = [(Zc + 2Zb + Za) - (Zi + 2Zh + Zg)]/8\Delta y \quad (eq. 3)$$

Em que *Z* é a elevação de cada pixel, *Dx* representa a direção norte-sul, *Dy* a direção leste-oeste e  $\Delta x$  e  $\Delta y$  são as distâncias entre os pixels nas direções X e Y respectivamente.

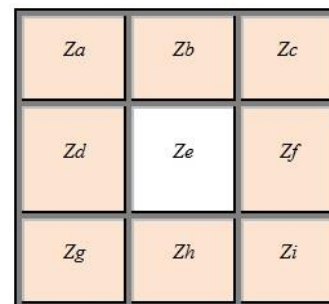


Figura 2. Células que compõem uma janela 3x3 pixels.

Os parâmetros foram discretizados: a declividade em quatro classes, o gradiente altimétrico em seis e quatro classes com predomínio de áreas planas (quadro 1) que, combinados, resultam em até 96 formas distintas de relevo.

Quadro 1. Parametrização e particionamento das variáveis morfométricas.

DECLIVIDADE		GRADIENTE ALTIMÉTRICO		PREDOMÍNIO DE ÁREAS PLANAS	
Código	Parâmetro	Código	Parâmetro	Código	Parâmetro
A	> 80% de áreas planas / suaves	1	0 - 30m	a	> 75% de áreas planas/suaves nas terras baixas
B	50 a 80% de áreas planas / suaves	2	30 - 91m	b	50 a 75% de áreas planas/suaves
C	20 a 50% de áreas planas / suaves	3	91 - 152m	c	50 a 75% de áreas planas/suaves
D	< 20% de áreas planas / suaves	4	152 - 305m	d	< 75% de áreas planas/suaves nas terras altas
-	-	5	305-915m	-	-
-	-	6	> 915m	-	-

As 96 subclasses que representam o maior nível de detalhamento da tríade hierárquica foram reagrupadas em 24 classes e estas, por sua vez, em 5 categorias principais (quadro 2). Devido à baixa representatividade das atribuições qualitativas originais na área de estudo, foi realizada uma reinterpretação das classes cartografadas adequando a terminologia ante o contexto geomorfológico local.

Fez-se uso dos dados SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), versão 4 (CGIAR-CSI, 2006), adotando-os como o MDE de referência, cujas etapas de processamento, parametrização e classificação foram realizadas com auxílio do *software* ArcGIS 10 (ESRI, 2010).

A janela adotada por Hammond (1964) foi de 9,65km x 9,65km, enquanto Dikau (1991), a partir de um MDE com espaçamento de 200m, definiu uma janela de 9,8km x 9,8km (49x49 pixels). Dadas as características do MDE SRTM, com resolução espacial de 3 arco-segundos, reamostrada para 90m, foram modelados três cenários para a área que contempla o estado do Paraná, com a variação do tamanho da janela móvel: a) mantendo a proposta original (9,63 x 9,63km, que no presente contexto constitui 107x107 pixels); b) metade do tamanho da janela (4,77 x 4,77km ou 53x53 pixels) e; c) a quarta parte da janela original (2,43 x 2,43km ou 27x27 pixels), a fim de avaliar o efeito de maior detalhamento na classificação.

Manteve-se, também, o valor limítrofe de 8% da declividade para dividir relevos planos e suaves dos relevos ondulados e montanhosos,

igualmente aos valores empregados por Hammond (1964) e Dikau (1991). O quadro 3 apresenta uma comparação entre as três propostas de classificação, evidenciando, em síntese, as principais características de cada uma delas.

Quadro 2. Níveis hierárquicos da classificação morfológica/morfométrica.

TIPO DE FORMA DO RELEVO	CLASSE DE FORMA DO RELEVO	CÓDIGO DAS SUBCLASSES DO RELEVO
Relevo plano	Planos regulares	A1a, A1b, A1c, A1d
	Planos suaves	A2a, A2b, A2c, A2d
	Planos irregulares	B1a, B1b, B1c, B1d
	Planos irregulares com variação altimétrica	B2a, B2b, B2c, B2d
Relevo patamarizado	Patamares com baixa variação altimétrica	A3c, A3d, B3c, B3d
	Patamares com moderada variação altimétrica	A4c, A4b, B4c, B4d
	Patamares com alta variação altimétrica	A5c, A5d, B5c, B5d
	Patamares com muito alta variação altimétrica	A6c, A6d, B6c, B6d
Relevo suave ondulado	Relevo suave ondulado com baixa variação altimétrica	A3a, A3b, B3a, B3b
	Relevo ondulado com moderada variação altimétrica	A4a, A4b, B4a, B4b
	Relevo suave ondulado com alta variação altimétrica	A5a, A5b, B5a, B5b
	Relevo suave ondulado com muito alta variação altimétrica	A6a, A6b, B6a, B6b
Relevo ondulado	Relevo ondulado regular	C1a, C1b, C1c, C1d
	Relevo ondulado com muito baixa variação altimétrica	C2a, C2b, C2c, C2d
	Relevo ondulado com baixa variação altimétrica	C3a, C3b, C3c, C3d
	Relevo ondulado com moderada variação altimétrica	C4a, C4b, C4c, C4d
	Relevo ondulado com alta variação altimétrica	C5a, C5b, C5c, C5d
	Relevo ondulado com muito alta variação altimétrica	C6a, C6b, C6c, C6d
Relevo dissecado	Relevo dissecado regular	D1a, D1b, D1c, D1d
	Relevo dissecado com muito baixa variação altimétrica	D2a, D2b, D2c, D2d
	Relevo dissecado com baixa variação altimétrica	D3a, D3b, D3c, D3d
	Relevo dissecado com moderada variação altimétrica	D4a, D4b, D4c, D4d
	Relevo dissecado com alta variação altimétrica	D5a, D5b, D5c, D5d
	Relevo dissecado com muito alta variação altimétrica	D6a, D6b, D6c, D6d

Quadro 3. Comparação entre as aplicações originais e a atual.

	Hammond (1964)	Dikau et al. (1991; 1995)	Proposta atual
Localização / Área	Estados Unidos da América / 9.826.675 km <sup>2</sup>	Estado do Novo México (EUA) / 314.255 km <sup>2</sup>	Estado do Paraná (Brasil) / 199.315 km <sup>2</sup>
Fonte de dados	Cartas topográficas, escala 1:250.000 ( <i>Army Map Service</i> , EUA)	MDE derivado de cartas topográficas na escala 1:250.000 (USGS, originalmente DMA, EUA)	Modelo Digital de Elevação derivado dos dados SRTM
Resolução do dado	Intervalo do contorno: 15,2-61m	200m	90m
Tamanho da área amostral (janela)	9,65km x 9,65km	9,8km x 9,8km	9,63km x 9,63km 4,77km x 4,77km 2,43km x 2,43km
Deslocamento da área amostral	9,65km	200m	90m
Densidade amostral (número de janelas / 1000km <sup>2</sup> de área)	110	250,000	1,23 milhões
Escala do mapa final	1:5.000.000	1:1.000.000 (variável)	1:180.000 (variável)

### Resultados e discussão

A discussão dos resultados está apresentada em três partes: a) questões pertinentes ao tamanho da janela móvel amostral; b) ao processo de classificação, evidenciando os agrupamentos e a

representatividade de formas do relevo; c) parâmetros de modelagem e taxonomia do relevo, evidenciando as potencialidades e limitações de aplicação da proposta.

**Janela móvel amostral**

As nove classificações obtidas, com três tamanhos de janelas amostrais para os três níveis hierárquicos (figuras 3, 5 e 6), demonstraram que a determinação das janelas afeta diretamente o resultado obtido. Quanto menor o tamanho da janela móvel utilizada para o cálculo de predomínio das variáveis geomorfométricas, maior é o nível de detalhamento da classificação. Assim, a opção pela escolha da área amostral deve estar diretamente relacionada ao fator de escala pretendido para a representação classificatória e também ao nível de generalização ou

detalhamento das feições de interesse a serem mapeadas.

Entretanto, esse efeito de generalização / detalhamento não ocorre de maneira igualitária e constante em todo o relevo do Paraná. Considerando seus distintos tipos (figura 3), denota-se que áreas com padrões homogêneos, seja de alta rugosidade como a Serra do Mar, ou de baixa rugosidade como a Planície Litorânea (figura 4A), tendem a manter o padrão predominante na unidade, influenciando diretamente nos limites entre elas. Já as áreas com rugosidade irregularmente distribuídas, que comumente ocorre nos Planaltos (figura 4B), apresentam mudanças mais significativas na delimitação das unidades morfológicas, diretamente relacionadas com a variação do tamanho da área amostral.

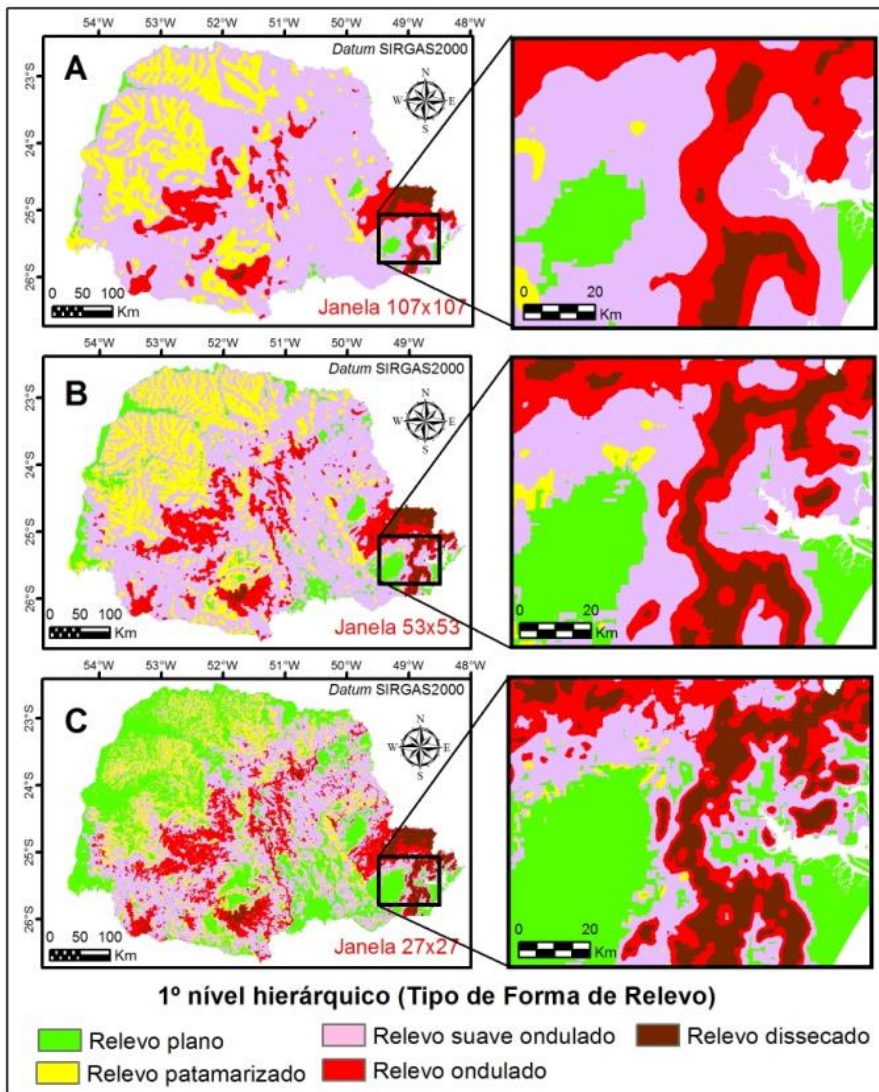


Figura 3. Classificações resultantes do 1º nível hierárquico (tipo de forma de relevo)

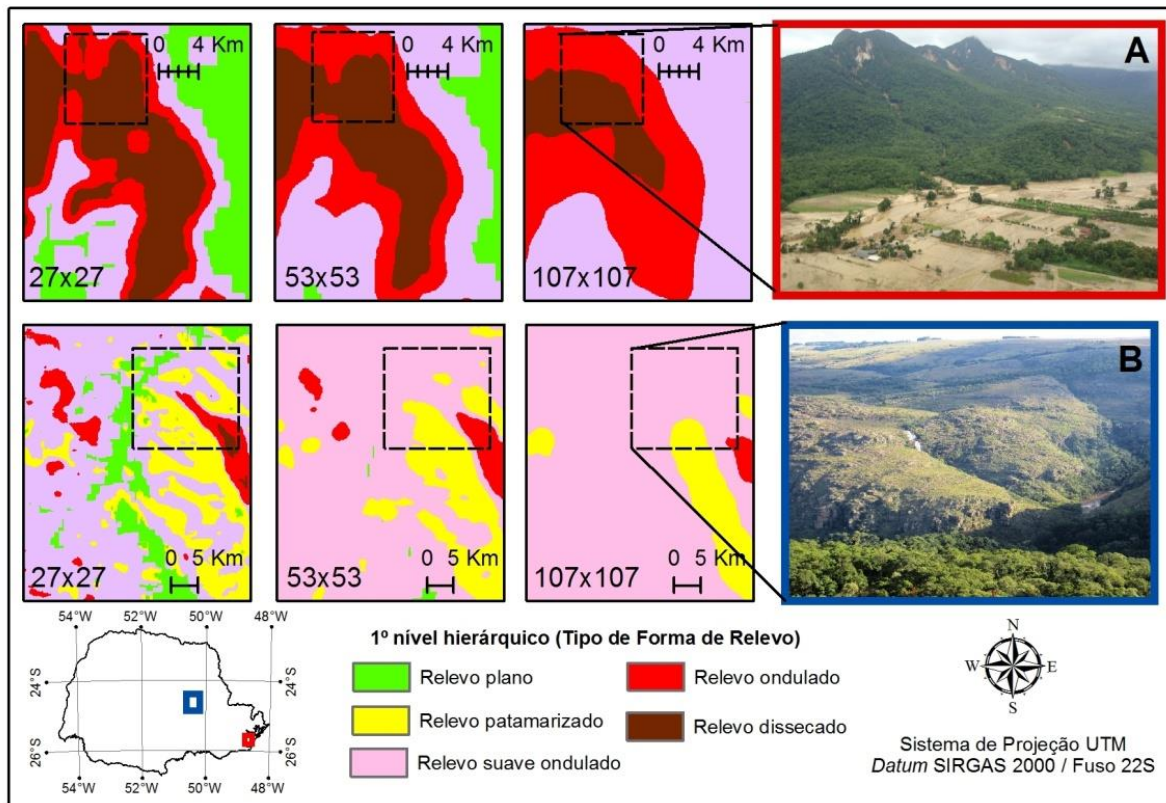


Figura 4. Exemplos da variação da janela amostral no primeiro nível hierárquico (tipo de forma de relevo). A) Serra do Mar; B) Planalto de Jaguariaíva.

Como exemplo, considerando os grandes compartimentos de planaltos, relativos às unidades expressas no 2º nível taxonômico delimitados no mapeamento geomorfológico do estado do Paraná por Santos *et al.* (2006) e o primeiro nível hierárquico da proposta de classificação de Hammond (1964), a tabela 1 apresenta a comparação da ocorrência entre as classes mapeadas e a proporção de área ocupada por cada uma delas. O Primeiro Planalto no resultado classificatório da janela 107x107 (figura 3A), apresentou 5% de áreas planas enquanto na classificação mais detalhada (figura 3C) essa mesma classe ocupou 28% da área total. A variação no Terceiro Planalto foi ainda maior, de 1% para 29%, considerando as janelas mencionadas em forma de relevo plano. Especialmente esses valores demonstram que as

áreas com menores valores de declividade são mais sensíveis às mudanças na adoção do tamanho da janela amostral, se comparado às classes mais declivosas.

Nos outros dois níveis hierárquicos (figuras 5 e 6), devido ao maior número de classes, o efeito da janela móvel é evidenciado pela discrepância e pelo detalhamento entre as feições mapeadas.

As diferenças nos resultados obtidos com a variação da janela móvel apontam que, dentre as três áreas amostrais testadas, a janela de 53x53 pixels (4,7km x 4,7km) foi a mais representativa, tendo como critérios a escala utilizada como referência, a qualidade e resolução do MDE e o conhecimento geomorfológico prévio evidenciado por trabalhos anteriores.

Tabela 1. Ocorrência (expressa em %) dos tipos de formas de relevo, considerando as três janelas amostrais testadas, em relação aos três grandes compartimentos de planaltos paranaenses (unidades morfoesculturais).

Forma de relevo (%)	Primeiro Planalto			Segundo Planalto			Terceiro Planalto		
	107x107	53x53	27x27	107x107	53x53	27x27	107x107	53x53	27x27
Relevo plano	5,5	14,4	27,6	0,8	6,5	22,9	1,0	5,7	29,1
Relevo patamarizado	2,9	3,3	1,9	3,9	7,4	9,1	28,7	30,0	18,3
Relevo suave ondulado	53,2	43,2	30,5	88,0	75,7	54,6	60,0	52,5	39,6
Relevo ondulado	27,6	27,3	27,2	7,3	10,2	12,7	10,0	11,4	12,3
Relevo dissecado	10,9	11,8	12,8	0,0	0,1	0,7	0,2	0,4	0,8

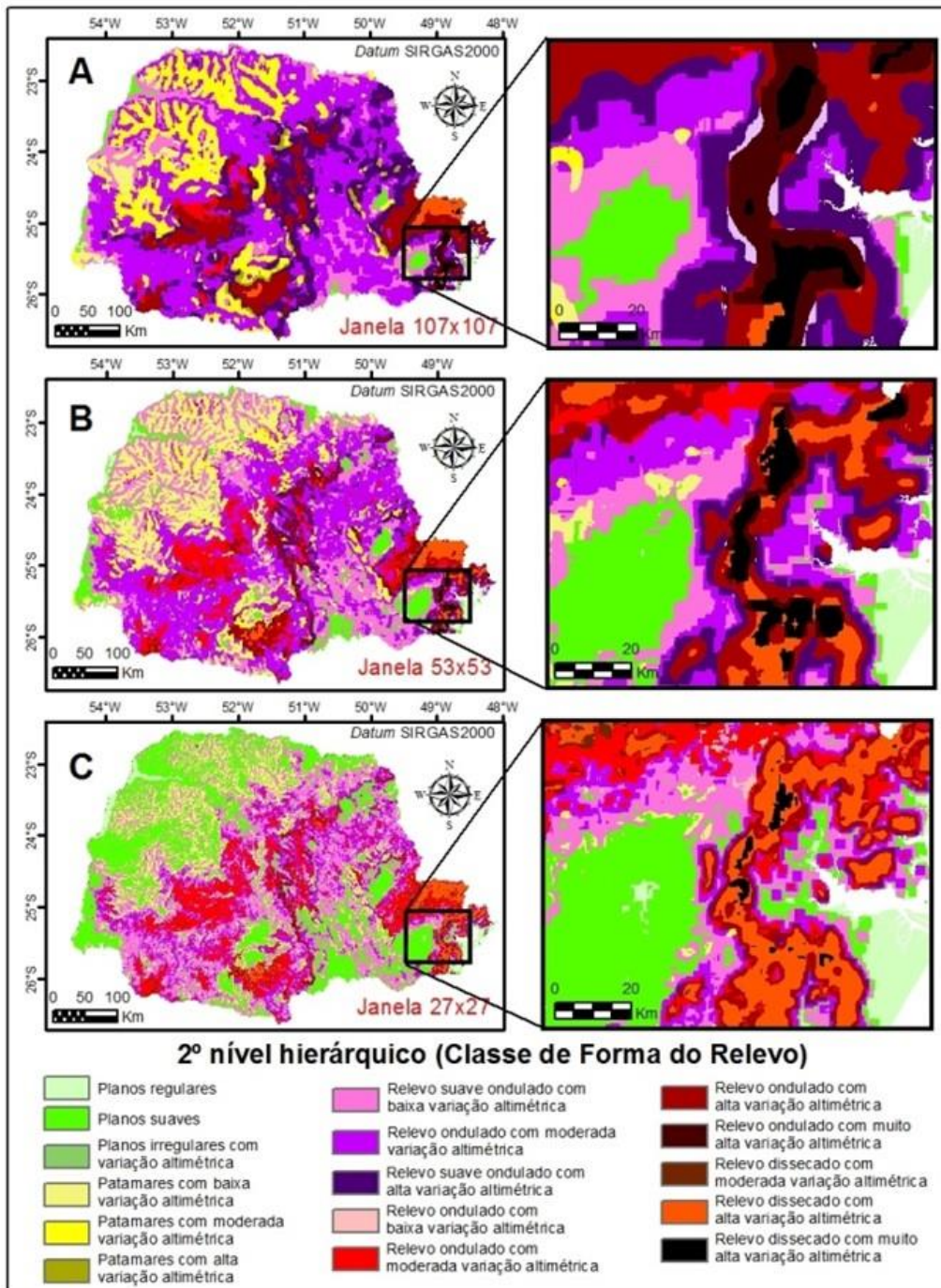


Figura 5. Classificações resultantes do 2º nível hierárquico (classe de forma de relevo).

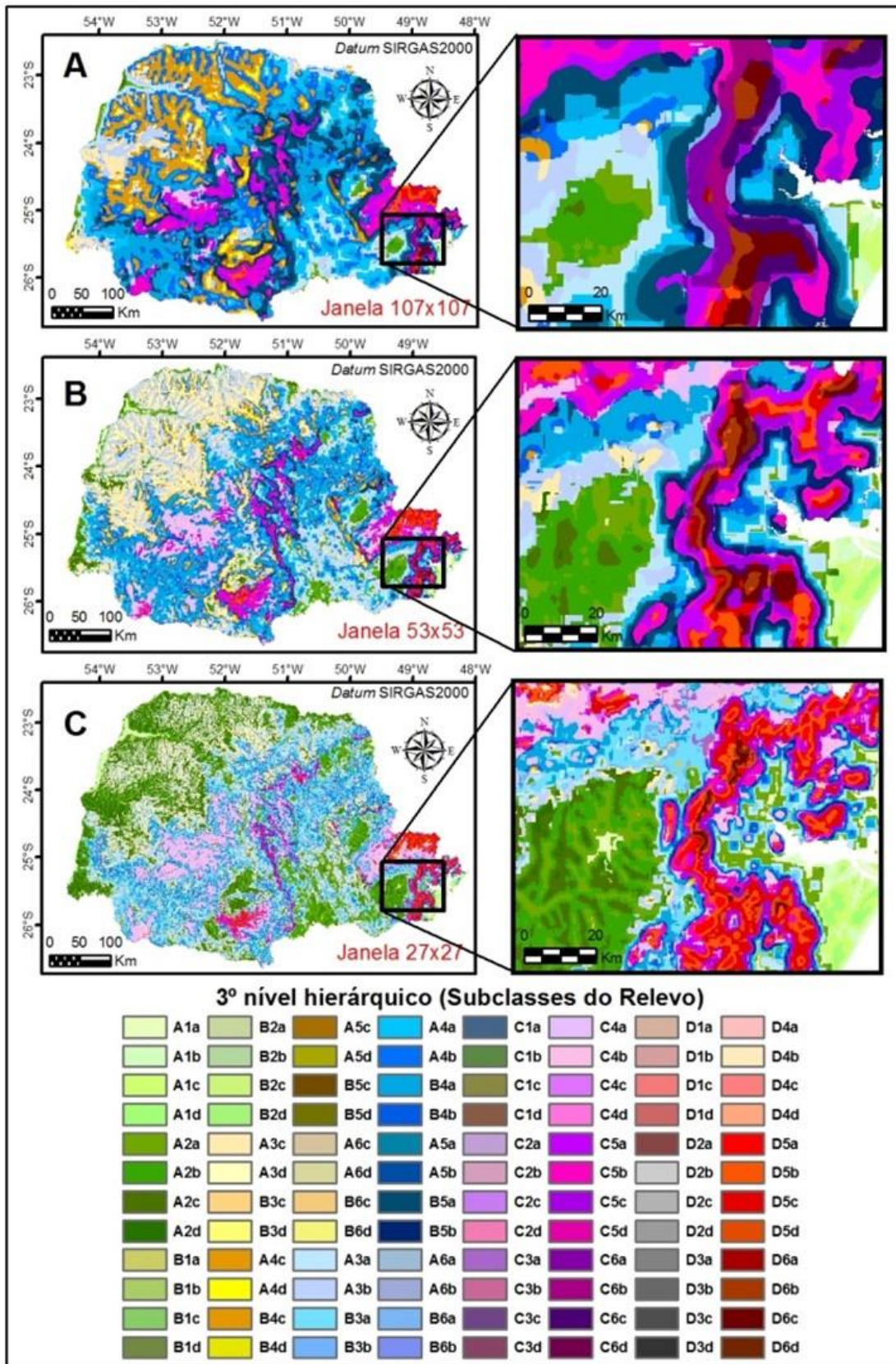


Figura 6. Classificações resultantes do 3º nível hierárquico (subclasses do relevo).

Devido aos problemas decorrentes do efeito de generalização/detalhamento apontados

anteriormente, uma alternativa para ajustar os limites e definir as incertezas das classes mapeadas é a utilização de janelas com tamanhos



específicos para determinadas áreas, ou seja, janelas amostrais que variam conforme as características topográficas locais. Dessa maneira, a região serrana passaria a ter uma janela com o tamanho adequado à sua configuração morfométrica local, da mesma forma se empregado nas planícies, planaltos e outros grandes compartimentos geomorfológicos que apresentam maior homogeneidade.

Para que a definição da área amostral não seja definida de maneira arbitrária, tornando-se ainda mais subjetiva, informações morfométricas adicionais como a rugosidade do relevo (para delimitação de unidades homogêneas) e comprimento médio das vertentes (para delimitação de feições específicas) podem auxiliar no processo. Assim, tendo em vista o objetivo do mapeamento, o tamanho da janela móvel pode ser ajustado conforme valores obtidos por essas variáveis.

Também cabe destacar que a diversidade de unidades obtidas no processo de classificação denota a limitação da proposta na etapa de qualificação dos resultados obtidos em distintas áreas. A nomenclatura para os tipos e classes de relevo (1ª e 2ª ordem, respectivamente, na tríade hierárquica), conforme a proposta original, são pouco representativas para a extensão da área de estudo. As classes podem variar de dissecado para plano em um mesmo ponto analisado nas três janelas amostrais testadas. Assim, no experimento, a codificação para as subclasses de relevo na 3ª ordem hierárquica mostrou-se mais adequada pela caracterização das feições mapeadas sem atribuir terminologia específica que pode, ou não, se adequar à mudança de parâmetros ou de área de estudo.

#### *Processo de classificação*

A classificação obtida distinguiu áreas homogêneas e evidenciou diferenças do terreno de

acordo com os parâmetros preestabelecidos. Esses resultados não configuram um mapa geomorfológico, mas sim de uma classificação amparada em intervalos morfométricos que, preliminarmente, oferece subsídios para a compreensão do relevo sob a perspectiva morfológica.

A classificação derivada da janela amostral de 53x53 *pixels* distinguiu em escala regional as principais unidades geomorfológicas do estado. No 1º nível hierárquico as formas se diferenciam conforme os padrões de distribuição da rugosidade do relevo.

Nesse nível hierárquico a figura 7A evidencia a separação das áreas de planícies fluviais e a Serra do Mar, que está com três distintos níveis de dissecção: a) porções superiores de maior declividade, controlados por corpos graníticos; b) porções intermediárias, com litologia predominantemente composta por gnaisse-migmatíticos e c) porções inferiores, de rampas de colúvios. A figura 7B situada na região centro-sul do estado, apresenta a separação de características regionais distintas: os topos (denotando o níveis altimétricos do relevo disposto em patamares), vertentes alongadas em posição intermediária e fundos de vale.

A desvantagem desse método de classificação é a contemplação de áreas amostrais de distintos ambientes como de mesmo conjunto. Desse modo, unidades inseridas em contextos geomorfológicos distintos são agrupadas na mesma classe, devido às similaridades morfométricas. Exemplo disso ocorre na região da Serra do Mar, (figura 7A) composta por relevo com alta dissecção, que em termos morfogenéticos é completamente distinta da região próxima ao município de Guarapuava (figura 7B), no entanto ambas são agrupadas na mesma classe.

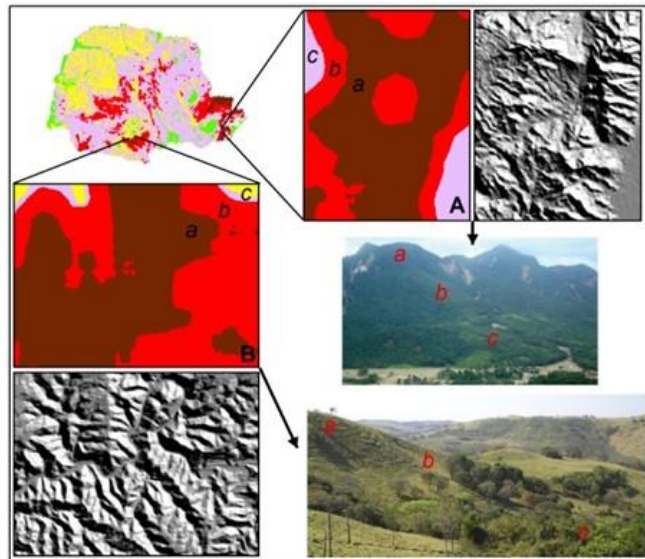


Figura 7. Recortes ilustrativos de tipos de relevo (1º nível hierárquico, janela 53x53) e relevo sombreado. A) região da Serra do Mar; B) região de Guarapuava. Fotos: A) Salazar (2011) e B) Zai (2005).

Apesar da equivalência em aspectos paramétricos, o segundo caso está inserido no contexto dos derrames basálticos do Terceiro Planalto, enquanto o primeiro corresponde aos

blocos soerguidos da Serra do Mar, com a maior amplitude altimétrica do estado.

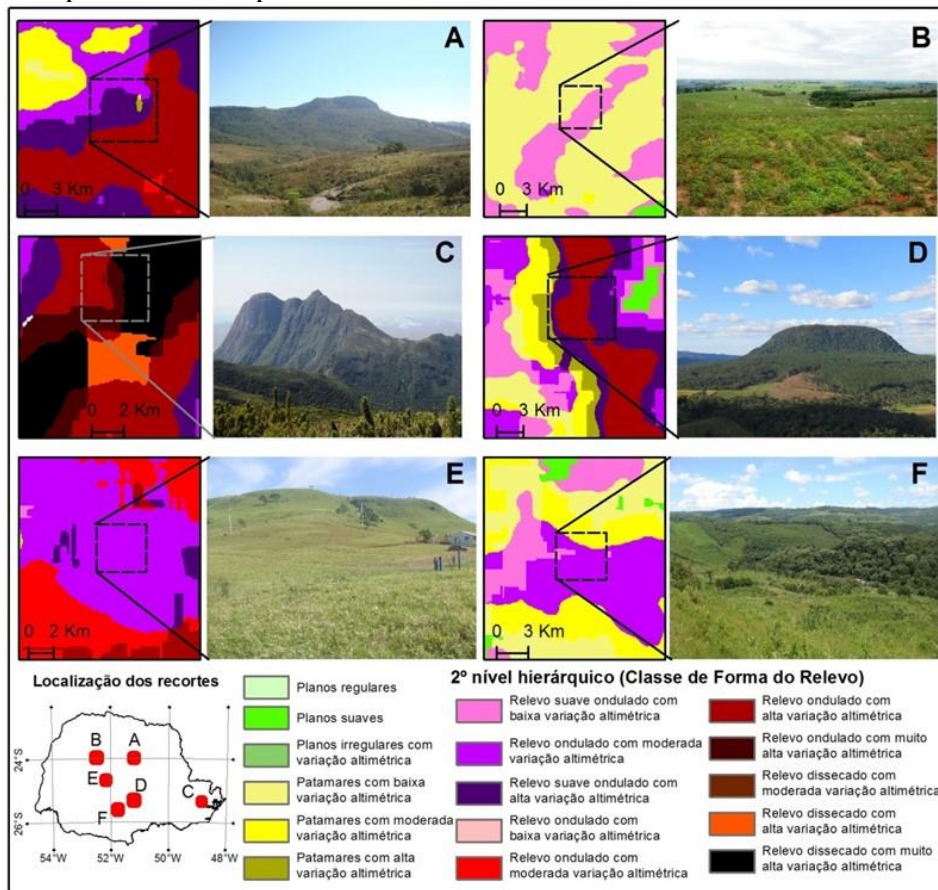


Figura 8. Recortes ilustrativos de classes de forma de relevo (2º nível hierárquico, janela 53x53). Fotografias: Silveira (2005).

Quando fragmentada em 24 classes, referente ao 2º nível hierárquico, o número

adicional de classes subdivide as 5 classes principais e não apresenta melhorias referentes à separação de classes em áreas descontínuas

pertencentes a contextos geomorfológicos variados. Ainda sim, as unidades realçam importantes feições do relevo, destacando-se: a) separação de unidades por altitude relativa; b) contato entre o Segundo e o Terceiro Planalto (figura 8A); c) feições características do relevo suave ondulado do noroeste do estado (figura 8B); d) principais picos da Serra do Mar (figura 8C); e) áreas de relevo com forte dissecação, como a região do Vale do Ribeira e a região do município de Guarapuava (figura 8D e 8F); f) classes mais detalhadas que permitem a identificação de feições menores realçadas em áreas de maior homogeneidade.

Neste nível hierárquico, poucas feições classificadas foram condizentes com as apresentadas na nomenclatura da proposta de Dikau (1991). Os topos das principais elevações da Serra do Mar, por exemplo, são classificados como “montanhas altas” enquanto as áreas adjacentes são classificadas como “montanhas baixas”. Diferentemente do que sugere a nomenclatura, essas classes representam níveis de dissecação e não unidades homogêneas como cadeias de montanhas ou morros isolados.

Quanto às unidades mais detalhadas, onde manteve-se a codificação, as 58 classes obtidas com a janela de 53 x 53 *pixels* (enquanto a área amostral de 107 x 107 teve 48 classes e a 27 x 27 identificou 59, de 96 possíveis) se mostraram representativas quando analisadas em escala de maior detalhe. Se por um lado o número pormenorizado de classes auxilia a fragmentação de feições, de outro o excesso de informação dificulta a leitura do produto final.

Essa elevada quantidade de classes possibilita o avanço da representação em termos taxonômicos. Entretanto, é importante destacar que dentre os três níveis hierárquicos propostos este é o mais sensível às variações de janela, parâmetros ou mesmo do espaçamento do MDE utilizado como referência.

A figura 9 demonstra a dependência dos critérios adotados em relação à representatividade da classificação, dadas as significativas diferenças visualizadas. Tomando como exemplo apenas a variação da janela móvel, o recorte ilustrativo (que contempla a Ilha do Mel e uma porção continental da planície litorânea, à esquerda), que reforça a importância de associar o fator de escala pretendido à interpretação posterior das classes resultantes. Assim, para esse nível hierárquico

pormenorizado, os trabalhos de campo e/ou o conhecimento prévio da área de estudo são importantes ferramentas auxiliares na etapa de calibração e refinamento do modelo.

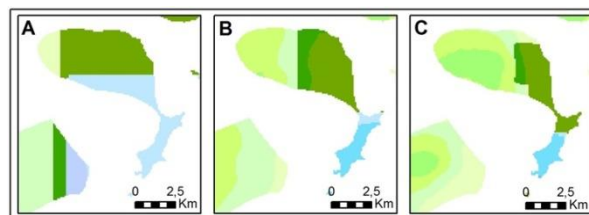


Figura 9. Efeitos da variação da janela móvel (subclasses de relevo, 3º nível hierárquico). A) Janela 107x107; B) Janela 53x53; C) Janela 27x27 pixels.

#### Parâmetros da modelagem e taxonomia do relevo

A discussão sobre a sensibilidade do método frente aos parâmetros de entrada denota a necessidade de embasar a escolha dos mesmos visando pormenorizar a elucidação dos erros e acertos da classificação.

Ao se considerar a área das três janelas móveis utilizadas em relação à hierarquia das ordens de grandeza (figura 10) proposta por Dikau (1990), verificou-se que todas se enquadram na categoria de mesorelevo, sendo que a maior janela (107x107 *pixels*) encontra-se muito próxima do limite com a categoria de macrorrelevo.

Essa simples conferência permite definir a abrangência do modelo e auxilia na fase de caracterização das classes mapeadas. Speight (2009), por exemplo, considera que uma forma de elemento pode ser definida por um raio de 20m (com área aproximada de 1300m<sup>2</sup>). Assim, com a análise das três áreas amostrais testadas neste trabalho, reforça-se a ideia de que o mapeamento de unidades em hierarquia abaixo de “forma de relevo” (figura 10) em termos taxonômicos, e de mesorelevo, em termos de ordens de grandeza, nesse cenário, não apresenta consistência. O mesmo se aplica em termos temporais, pois os processos geomorfológicos com essa extensão têm de média a longa duração.

Salienta-se que a definição qualitativa de cada nível hierárquico de classificação (originalmente chamados de tipo de forma do relevo, classe de forma do relevo e código das subclasses do relevo) também deve considerar essas características para que haja correlação com a hierarquia taxonômica.

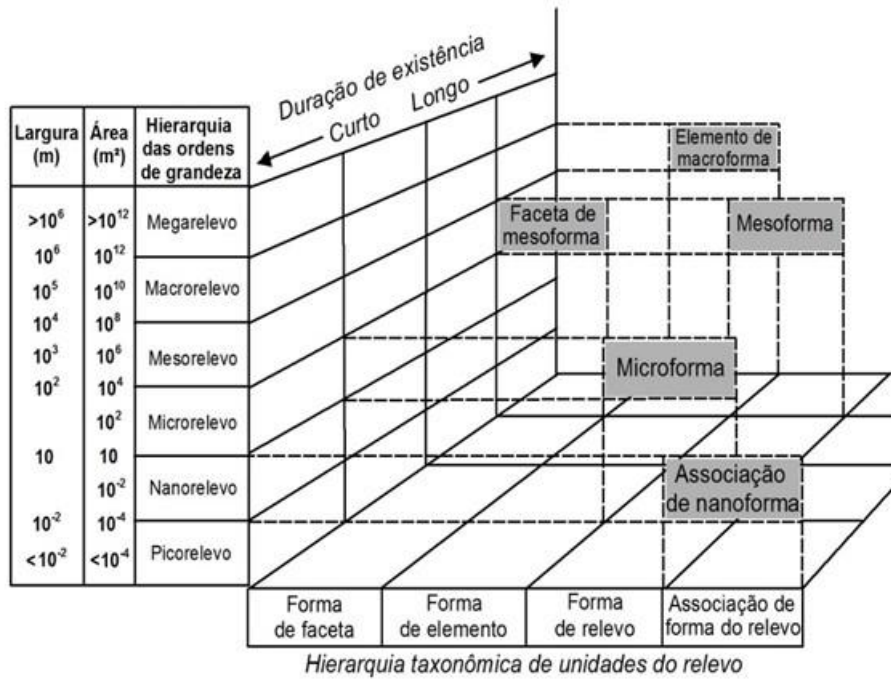


Figura 10. Hierarquia taxonômica de unidades do relevo. Fonte: adaptado de Dikau (1990).

Referente à influência do tamanho do *pixel* (resolução horizontal) nos resultados obtidos, destaca-se, inicialmente, a importância em considerar a variedade da base de dados de origem e sua escala, bem como o método adotado para obtenção dos MDEs e resolução da grade. Como a representação numérica do relevo pode ser obtida desde cartas topográficas (com diversas propostas de interpolação) até imageamentos por sensoriamento remoto (SRTM, LiDAR, entre outros), podendo ser disposta em grades regulares ou irregulares, a gama de possibilidades confere certa complexidade visando aplicações particulares. Somado a isso, o cálculo das variáveis direcionais, sejam primárias ou secundárias, também variam conforme as especificidades do MDE e, concomitantemente, conforme algoritmo empregado e tamanho da janela para o cálculo de determinado atributo topográfico.

A avaliação prévia do conjunto de dados foi subsidiada com base em considerações cartográficas de Vink (1975), apresentado e discutido de maneira aplicada à modelagem por Hengl (2006). Segundo o autor, a delimitação mínima legível (DML), ou seja, a menor área a ser mapeada, deve ser de 0,25cm<sup>2</sup> no mapa. A equação 4 ilustra esse conceito,

$$p = FE \cdot 0,0005 \quad (\text{eq. 4})$$

onde  $p$  é a resolução do *pixel*, em metros,  $FE$  é o fator de escala e o valor numérico se refere ao valor pretendido para a DML.

Dessa maneira, considerando o *pixel* de 90 metros do MDE SRTM, o fator de escala do dado de entrada é 1:180.000. Essa é uma escala média para mapeamento geomorfológico (DEMEK e EMBLETON, 1978; DRAMIS e BISCOI, 1998), sendo apropriada para representação de grandes unidades de paisagem (DRAMIS *et al.* 2011), que constitui o agrupamento de formas de relevo. Esse resultado aponta que a resolução espacial do MDE SRTM90 é compatível com o tamanho das áreas amostrais (apoiadas na taxonomia do relevo) testadas.

### Conclusões

A aplicação da proposta de mapeamento morfológico automatizado com o apoio de variáveis morfométricas evidenciou a possibilidade de realizar levantamentos geomorfológicos preliminares com baixo custo operacional, de maneira exequível, contemplando a importância do rigor metodológico e entendimento na tomada de decisão dos critérios da modelagem digital do terreno para a eficácia da classificação de formas do relevo.

Nessa perspectiva, reforça-se que o objetivo da classificação deve condizer com a escolha da janela móvel, com a resolução espacial do MDE e com a escala da base de dados. Embora o método tenha potencialidade para identificar feições geomorfológicas de mais detalhe (como

formas de vertentes e unidades individualizadas), sua aplicação é dependente de parâmetros mutuamente compatíveis e, proeminentemente, da inclusão de outros atributos topográficos e critérios de particionamento e discretização dos mesmos.

Embora os resultados denotem a tentativa de dar continuidade aos trabalhos de cartografia geomorfológica do estado do Paraná, este trabalho tem caráter introdutório e metodológico, ainda com muitas lacunas para aplicações posteriores e trabalhos futuros na temática da modelagem digital do relevo que podem subsidiar a construção de mapas geomorfológicos sistematizados de mais detalhe.

### Agradecimentos

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

### Referências

- Barka, I.; Vladovič, J.; Máliš, F. 2011. Landform classification and its application in predictive mapping of soil and forest units. *GIS Ostrava 1*, 23 – 26.
- Bologaro-Crevenna, A.; Torres-Rodríguez, V.; Sorani, V.; Frame, D.; Ortiz, M. A. 2005. Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico. *Geomorphology* 67, 407-422.
- Brabyn, L. 1998. GIS analysis of macro landform. In: *Proceedings of the Spatial Information Research Centre's 10th Colloquium*. University of Otago, Dunedin, New Zealand, pp. 35–48.
- Burrough, P. A.; Gaans, P. F. M.; Hootsmans, R. 1997. Continuous classification in soil survey: spatial correlation, confusion and boundaries. *Geoderma* 77, p. 115-135.
- CGIAR-CSI - Consortium for Spatial Information. 2006. Dados SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), versão 3, Disponível em: <http://srtm.csi.cgiar.org/>
- Demek, J.; Embleton, C. (Eds.) *Guide to Medium-Scale Geomorphological Mapping*. E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Na'gele u. Obermiller), Stuttgart, 1978.
- Dikau, R. 1990. Geomorphic landform modeling based on hierarchy theory, in: Brassel, K., Kishimoto, H. (Eds.), *Proceedings of the 4th International Symposium on Spatial Data Handling*. Department of Geography, University of Zürich, Zürich, Switzerland, pp. 230–239.
- Dikau, R.; Brabb, E. E.; Mark, R. M. 1991. *Landform Classification of New Mexico by Computer*. Open File report 91-634. U.S. Geological Survey.
- Dikau, R.; Brabb, E. E.; Mark, R. K.; Pike, R. J. 1995. Morphometric landform analysis of New Mexico. *Zeitschrift fur Geomorphologie Supplementband*. 101: 109-126.
- Dramis, F.; Bisci, C. 1998. *Cartografia Geomorfológica. Manuale di Introduzione al Rilevamento ed alla Rappresentazione Degli Aspetti Fisici del Territorio*. Pitagora Editrice, Bologna.
- Dragut, L.; Blaschke, T. 2006. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology* 81, 330–344.
- Dramis, F.; Guida, D.; Cestari, A. 2011. Nature and Aims of Geomorphological Mapping. In: SMITH, M.; PARON, P.; GRITHS, J. S. (Eds.). *Geomorphological mapping: methods and applications*. Vol. 15 of *Developments in Earth Surface Processes*. Elsevier, pp. 39–64.
- ESRI. 2010. ArcGis, Spatial Analyst, 3D Analyst. versão 10. Environmental Systems Research Institute.
- Evans, I. S. 1972. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics, in: CHORLEY, R. J. (Ed.). *Spatial Analysis in Geomorphology*. Harper and Row, pp. 17–90.
- Gallant, A. L.; Brown, D. D.; Hoffer, R. M. 2005. Automated Mapping of Hammond's Landforms. *IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters*, vol. 2, n. 4, p. 384-388.
- Hammond, E. H. 1964. Analysis of properties in land form geography: an application to broad-scale land form mapping. *Annals of the Association of American Geographers* 54, 11–19.
- Hengl, T. 2003. *Pedometric mapping: bridging the gaps between conventional and pedometric approaches*. Wageningen University, Enschede, 233p. PhD thesis.
- Hengl, T. 2006. Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences* 32, 1283–1298.
- Hengl, T.; Reuter, H. I. (Eds.) 2008. *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. *Developments in Soil Science*, vol. 33, Elsevier, 772 p.

- Horn, B. K. P. 1981. Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE* 01, 14-47.
- Iwahashi, J. Watanabe, S.; Furuya, T. 2001. Landform analysis of slope movements using DEM in Higashikubiki area, Japan. *Computers & Geosciences* 27, 851-865.
- Iwahashi, J.; Pike, R. J. 2007. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. *Geomorphology* 86, 409-440.
- Hrvatin, M.; Perko, D. 2009. Suitability of Hammond's method for determining landform units in Slovenia. *Acta geographica Slovenica* 49, 343-366.
- Pike, R. J. 2000. Geomorphometry: diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography* 24, 1-20.
- Pike, R. J. 2005. Geomorphometry: progress, practice, and prospect. *Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband* 101, 221-238.
- Maack, R. R. 1981. *Geografia Física do Estado do Paraná*. 2. ed. Curitiba: Ed. Olympio.
- Macmillan, R. A.; Pettapiece, W. W.; Nolan, S. C.; Goddard, T. W. 2000. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems* 113, 81-109.
- Macmillan, R. A.; Shary, P. A. 2009. Landform and landform elements in geomorphometry. in: Hengl, T.; Reuter, H. I. (eds.) *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications, Series Developments in Soil Science* 33, 227-254.
- Mark, D. M.; Smith, B. 2004. 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.
- Meyer, N. K.; Schwanghart, W.; Korup, O.; Romstad, B.; Etzelmüller, B. 2014. Estimating the topographic predictability of debris flows. *Geomorphology* 207, 114-125.
- Minár, J.; Evans, I. S. 2008. Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology* 95, 236-259.
- Möller, M.; Koschitzki, T.; Hartmann, K.; Jahn, R. 2012. Plausibility test of conceptual soil maps using relief parameters. *Catena* 88, 57-67.
- Oka-Fiori, C.; Santos, L. J. C.; Canali, N. E.; Fiori, A. P.; Silveira, C. T.; Silva, J. M. F.; Ross, J. L. S. 2007. *Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000*. Curitiba, MINEROPAR.
- Reuter, H. I. 2009. *ArcGis Geomorphometry Toolbox: Version 1.0.2*. Gisxperts GBR, Germany.
- Romstad, B. 2001. Improving relief classification with contextual merging. *Proceedings of ScanGIS'2001 — The 8th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science*. Ås, Norway, p. 3-13.
- Ross, J. S. Registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. *Revista do Departamento de Geografia* 6, 17-29.
- Santos, L. J. C.; Oka-Fiori, C.; Canali, N. E.; Fiori, A. P.; Silveira, C. T.; Silva, J. M. F.; Ross, J. L. S. 2006. Mapeamento geomorfológico do Estado do Paraná. *Revista Brasileira de geomorfologia* 7, 03-12.
- Seijmonsbergen, A. C.; Hengl, T.; Anders, N. S. 2011. Semi-automated extraction of geomorphological features using DEMs. In: Smith, M. J.; Paron, P.; Griffiths, J. eds. *Geomorphological Mapping: Methods and Applications, Developments in Earth Surface Processes* 15, Elsevier.
- Silveira, C. T.; Oka-Fiori, C.; Santos, L. J. C.; Sirtoli, A. E.; Silva, C. R.; Botelho, M. F. 2013a. Soil prediction using artificial neural networks and topographic attributes. *Geoderma (Amsterdam)* 195-196, 165-172.
- 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. 2013b. Emprego de atributos topográficos no mapeamento da susceptibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacaré/Paraná. *Sociedade & Natureza (UFU. Online)* 24, 623-639.
- Speight, J. G. 2009. Land classification. In: *Australian soil and land survey field handbook (3ª edição)*. National Committee on Soil And Terrain, CSIRO, Melbourne.
- Tinós, T. M.; Ferreira, M. V.; Riedel, P. S.; Zaine, J. E. 2014. Aplicação e avaliação de metodologia de classificação automática de padrões de formas semelhantes do relevo. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 15, 353-370.

- Vink, A. 1975. Land Use in Advancing Agriculture, vol. X. Springer, New York, NY, 394pp.
- Weiss, A. 2001. Topographic Position and Landforms Analysis. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA.
- Wilson, J. P. 2012. Digital terrain modelling. *Geomorphology* 137, 107–121.
- Wilson, J. P.; Gallant, J. C. (eds.). 2000. *Terrain analysis: principles and applications*. New York: John Wiley & Sons, p.1-27.
- Wood, J. 1996. The geomorphological characterisation of Digital Elevation Models. PhD Thesis - University of Leicester. Disponível em: <http://www.soi.city.ac.uk/~jwo/phd>. Leicester, UK.