



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Proposta metodológica para mapeamento geomorfológico baseada na análise digital do relevo: aplicação no estado do Paraná (Brasil)

Ricardo Michael Pinheiro Silveira¹, Claudinei Taborda da Silveira²

¹Universidade Federal de Rondonópolis, <http://orcid.org/0000-0002-5664-7079> e-mail: ricardomichaelps@gmail.com (correspondente)

²Universidade Federal do Paraná, <http://orcid.org/0000-0001-6289-6306> e-mail: claudineits@ufpr.br

Artigo recebido em 16/01/2023 e aceito em 09/05/2023

RESUMO

O presente estudo propõe uma metodologia para mapeamento geomorfológico semiautomatizado, integrando elementos morfométricos, morfográficos, morfogenéticos, morfodinâmicos e morfocronológicos, utilizando somente atributos geomorfométricos calculados de um Modelo Digital de Elevação (MDE). As regras classificatórias orientadas a objeto foram aplicadas no estado do Paraná, sul do Brasil. A elaboração da proposta metodológica contemplou quatro etapas principais: i) aquisição e correção da base de dados para a interpolação do MDE (método Topogrid) e cálculo de oito atributos geomorfométricos (altimetria, declividade, relevo sombreado, perfil de curvatura, área de contribuição, Índice de Posição Topográfica, Black Top Hat, White Top Hat, Índice Topográfico de Umidade e Índice de Potência do Escoamento); ii) criação das regras de classificação parametrizada, para cada objeto de cada aspecto geomorfológico; iii) etapas de controle de campo, validação e interpretação dos resultados obtidos; iv) composição da legenda. Foram modelados os seguintes objetos: i) Morfografia: vales (fechados, abertos e planos), topos (aguçados e convexos), cristas, planície de inundação (fluvial e fluvio-marinha), terraços e cones de dejeção; ii) Morfogênese: fluvio-marinha, fluvial e denudacional; iii) Morfodinâmica: suscetibilidade à corrida de detritos e erosão potencial; iv) Morfocronologia: reconstituição de cinco paleosuperfícies (50, 15, 5, 0,5 e 0,25 milhões de anos); v) Morfometria: nível de base local e cartogramas de atributos geomorfométricos. Os resultados da modelagem evidenciaram a possibilidade da criação de um mapa geomorfológico, com todos seus aspectos essenciais, utilizando-se apenas procedimentos vinculados à análise digital do relevo – reforçando seu potencial como principal ferramenta metodológica para a cartografia geomorfológica. Palavras-chave: Geomorfometria; Cartografia Geomorfológica; Modelo Digital do Terreno; Atributos geomorfométricos; Relevo do Paraná.

Methodological proposal for geomorphological mapping based on digital terrain analysis: application in the state of Paraná (Brazil)

ABSTRACT

This paper proposes a methodology for semiautomated geomorphological mapping, integrating morphometric, morphographic, morphogenetic, morphodynamic and morphochronological elements, using only geomorphometric attributes quantitative measured from a Digital Elevation Model (DEM). The object-oriented classificatory rules were applied in the state of Paraná, Brazil. The elaboration of the methodological proposal contemplated five main stages; i) acquisition and correction of the database for the DEM interpolation (Topogrid method) and calculation of eight geomorphometric attributes (altimetry, slope, hillshade, profile curvature, contribution area, Topographic Position Index, Black Top Hat, White Top Hat, Topographic Wetness Index and Stream Power Index); ii) creation of the parametrized classification rules, for each object of each geomorphological aspect; iii) stages of field control, validation and interpretation of results; iv) composition of the legend. The following objects were modeled: i) Morphography: valleys (V-shaped, U-shaped and flat), tops (sharp and convex), ridges, flood plain (fluvial and fluvio-marine), terraces and alluvial fans; ii) Morphogenesis: fluvio-marine, fluvial and denudational; iii) Morphodynamics: susceptibility to the debris flow and potential erosion; iv) Morphochronology: reconstitution of five paleosurfaces (50, 15, 5, 0.5 and 0.25 million years); v) Morphometry: local base level and geomorphometric attributes cartograms. The modeling results showed the possibility of developing a geomorphological map, with all its essential aspects, using only procedures linked to digital terrain analysis – reinforcing its potential as the main methodological tool for geomorphological cartography. Key words: Geomorphometry; Geomorphological cartography; Digital Terrain Model; Geomorphometric attributes; Paraná landforms.

Introdução

Um mapa geomorfológico é uma complexa representação temática devido ao elevado número de informações requeridas: morfometria, morfografia, morfogênese, morfodinâmica e morfocronologia; às subjetividades intrínsecas à interpretação dos fatos geomorfológicos e devido às concepções têmporo-espaciais multiescalares associadas à representação do relevo.

A abordagem quantitativa para o mapeamento de feições e processos atuantes na superfície foi favorecida pela disponibilidade de Modelos Digitais de Elevação (MDE) e dos respectivos atributos geomorfológicos calculados (Wilson e Gallant, 2000; El-Sheimy et al., 2005; Li et al., 2005; Hengl e Reuter, 2009). Aplicada à cartografia geomorfológica, as técnicas geomorfológicas despontaram como ferramenta essencial de análise e mapeamento, tanto pela crescente disponibilidade de dados morfométricos quanto pela otimização da capacidade de processamento em ambiente informatizado (Pike, 2000; Seijmonsbergen et al., 2011; Bishop et al., 2012; Wilson, 2012).

Na transição entre a geomorfometria geral, com o tratamento de dados contínuos, para a geomorfometria específica, com a definição de objetos discretos (Evans, 1972; Macmillan e Shary, 2009), muitas classificações de formas do relevo e processos geomorfológicos vêm sendo propostas com parâmetros calculados a partir MDEs com distintas características de aquisição. Assim, tanto os valores dos parâmetros quanto as características dos objetos variam considerando diversos fatores, tais como o modelo matemático pelo qual são calculados, o tamanho da janela móvel para os cálculos de vizinhança dos atributos geomorfológicos e a resolução da célula do MDE (Shary et al., 2002; Pipaud et al., 2015).

Desde os estudos pioneiros sobre o processamento de dados de elevação para a classificação de formas do relevo ou para descrever quantitativamente a morfologia, sobretudo a partir da década de 1970, o aparato técnico favorável às aplicações nem sempre foi acompanhado de reflexões adequadas às questões qualitativas, semânticas, ontológicas e, portanto, conceituais acerca dos objetos modelados e da sua representatividade na paisagem (Smith e Mark, 2003; Deng, 2007).

No âmbito da integração entre MDEs e ferramentas de GIS, com destaque inicial para a classificação de feições elementares como: picos, cumes, depressões, canais, desfiladeiros e planos,

de Wood (1996), e a classificação hierárquica de formas de relevo de Dikau et al. (1991), houve uma evolução nas análises estatísticas, nas combinações de parâmetros e na inclusão de dados não topográficos em modelagens de maior complexidade (Pike et al., 2009). Atualmente, para escalas de detalhe, o uso de LiDAR desponta como principal avanço aplicado à cartografia geomorfológica (Saritha et al., 2021).

Dentre as possibilidades de classificação geomorfológica, salientam-se algumas aplicações em: i) propostas de mapeamento morfográfico, com técnicas não supervisionadas (Iwahashi e Pike, 2007), automatizadas (Dragut e Eisank, 2012; Jasiewicz e Stepinski, 2013), semiautomatizadas (Ehsani e Quiel, 2008), de segmentação (Minár e Evans, 2008; Matsuura e Aniya, 2012; Pipaud e Lehmkuhl, 2017), por combinação de atributos (Ghosh e Bera, 2023) e por redes neurais (Ehsani e Quiel, 2008; Vilorio et al., 2016); ii) indicações morfogenéticas ou morfocronológicas, com modelos de evolução da paisagem (Chen et al., 2014), mapeamento de peneplanos (Haider et al., 2015), mapeamento preditivo de paleosuperfícies (Soares e Riffel, 2006) e estimativa de alterações volumétricas temporais no processo de erosão e deposição (Cavalli et al., 2017); iii) mapeamento de processos morfodinâmicos, tais como predição de corridas de detritos (Meyer et al., 2014; Horton et al., 2013), suscetibilidade à erosão por estatística multivariada (Akgün e Türk, 2011) e a deslizamentos (Othman et al., 2018).

No Brasil, além da prevalecência morfográfica apontada por Silveira e Silveira (2021) e Silva (2021), algumas publicações recentes de cartografia geomorfológica se atêm a métodos tradicionais, tais como os mapeamentos de Minas Gerais (Rodrigues et al., 2023), das planícies sul-rio-grandenses (Moura, 2022), da zona costeira de Sergipe (Ramos et al., 2021) e da porção sul catarinense com ênfase na morfodinâmica (Valdati et al., 2021). No âmbito da modelagem, destaca-se a publicação de Bortolini e Silveira (2021) que utilizaram segmentação multiresolucional para mapeamento da região de Curitiba.

Embora uma das principais justificativas para a utilização da geomorfometria seja a redução das subjetividades na etapa de mapeamento, deve-se ponderar que o relevo pode ser descrito sob duas perspectivas: baseado na geometria dos objetos ou baseado nas semânticas usadas para expressar modelos conceituais mentais subjetivos desses

mesmos objetos. Nessa relação entre a geomorfometria geral (extração de parâmetros) e geomorfometria específica (extração de objetos), considera-se o estabelecimento de critérios paramétricos como o virtual mediador entre as interpretações quantitativas e qualitativas que visam a unificação de ambas num produto cartográfico de síntese.

Entretanto, apesar das diversas propostas metodológicas para a identificação de feições ou processos geomorfológicos específicos, há uma lacuna em trabalhos que buscam sistematizar parâmetros geomorfométricos numa perspectiva integradora para a representação e interpretação do relevo contemplando morfometria, morfografia, morfogênese, morfodinâmica e morfocronologia. Em propostas de mapeamentos geomorfológicos atuais, a análise digital do relevo comumente é empregada de modo associativo a outras técnicas, como ferramenta auxiliar (Perego et al., 2011; Fonseca et al., 2014; Calvo e González, 2015; Allaart, 2016), mas raramente como base metodológica e operacional.

Parte-se da hipótese de que a geomorfometria, contemplando a relação entre as formas de relevo e os parâmetros numéricos usados para descrevê-las, possibilita a extração de assinaturas geomorfométricas (Pike, 1988) que, por sua vez, têm a potencialidade de subsidiar a construção de mapas geomorfológicos em escalas têmporo-espaciais específicas e predeterminadas. Considera-se, portanto, que a análise digital do terreno possibilita vincular dados morfométricos à interpretação do aspecto, origem, dinâmica e idade do relevo, tendo relação, ainda, com as características litológicas.

Nesse contexto, o estudo apresenta uma proposta metodológica para mapeamento geomorfológico amparada exclusivamente por técnicas geomorfométricas, derivando um conjunto de regras classificatórias semiautomatizadas a partir de um MDE e atributos geomorfométricos para a representação dos aspectos elementares do relevo (morfometria, morfografia, morfogênese, morfocronologia e morfodinâmica), adequados à escala de referência 1:50.000. Para testar a aplicabilidade do método numa perspectiva regional, de modo contínuo e em áreas com grande diversidade geomorfológica, o recorte espacial escolhido foi o estado do Paraná, cuja área é de 199315 km², localizado na região sul do Brasil.

Caracterização geológica e geomorfológica

O estado do Paraná possui cinco unidades morfoesculturais definidas (Maack, 1981) que caracterizam, regionalmente, a paisagem de leste a oeste: Planície Litorânea, Serra do Mar e três extensos Planaltos, cuja transição normalmente é marcada por segmentos de escarpas.

Em aspectos geológicos, conforme Mineropar (2001), destacam-se dois grandes compartimentos macroestruturais no estado do Paraná: a) o Escudo Paranaense, com as rochas magmáticas e metamórficas mais antigas do estado, do período Arqueano ao Paleozoico, constituintes do embasamento da Plataforma Sul-Americana e parcialmente recobertas por sedimentos Cenozoicos; b) a Bacia do Paraná, com rochas sedimentares e vulcânicas que recobriram o embasamento entre o período Siluriano e Cretáceo, e cujo registro estratigráfico compreende um pacote sedimentar-magmático com espessura próxima a 7 km, onde o depocentro estrutural da sinéclise coincide com a região da calha do rio Paraná (Milani et al., 2007), na porção oeste da área de estudo. O Escudo Paranaense está exposto na região leste e compreende o Primeiro Planalto, Serra do Mar e Planície Litorânea, enquanto a Bacia do Paraná ocupa a porção oeste, no Segundo e Terceiro Planaltos.

A Serra do Mar é caracterizada como uma serra marginal típica que se eleva com valores altimétricos compreendidos entre 500 e 1000 m de elevação em relação ao Primeiro Planalto (MAACK, 1981), com picos elevados de até 1877m de altitude, sustentadas por corpos graníticos e litologias metamórficas de alto grau, influenciadas, ainda, por sistemas de falhas, fraturas e diques que, conjuntamente, exercem controle na rede de drenagem e na escarpa do front montanhoso da Serra (SANTOS et al., 2006).

A área da Bacia do Paraná, composta por rochas sedimentares paleozoicas, aflorantes no Segundo Planalto, caracteriza-se como intracratônica com evolução sobre a Plataforma Sul-Americana. Sobrepostas a estes sedimentos ocorrem as rochas vulcânicas de idade mesozoica do Grupo Serra Geral, que constituem derrames basálticos originados pelo rift continental do Gondwana, formando o Terceiro Planalto, recobertos por sedimentos cretáceos depositados noroeste do estado. Sedimentos holocênicos ocorrem em todas as regiões, sobretudo nos vales dos rios, além dos depósitos inconsolidados na Planície Litorânea (MINEROPAR, 2001).

Material e métodos

As etapas metodológicas constam sintetizadas na figura 1 e são descritas a seguir. Destacam-se três grandes etapas: processamento do modelo digital de elevação e cálculo dos atributos geomorfométricos, com a definição dos parâmetros de modelagem para cada aspecto geomorfológico (morfometria, morfologia, morfogênese, morfodinâmica e morfocronologia), seguido das etapas de conferência em campo e da elaboração do sistema de legenda para a representação do mapa geomorfológico.

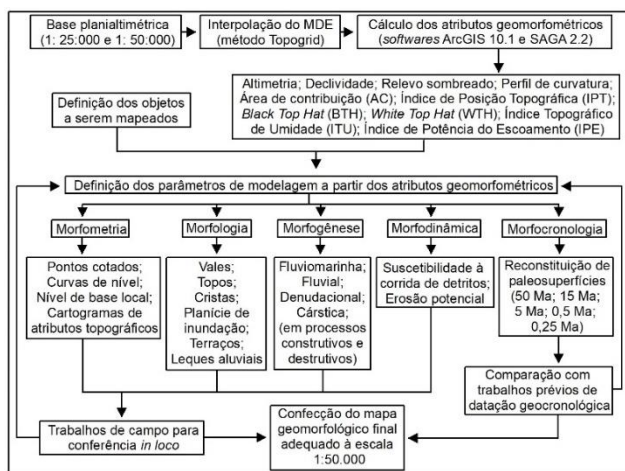


Figura 1 - Fluxograma metodológico.

Interpolação do MDE e cálculo dos atributos geomorfométricos

O método empregado para a obtenção do MDE foi o Topogrid (Hutchinson, 1989), cuja interpolação contemplou pontos cotados, curvas de nível e segmentos de hidrografia vetorizados de 96 cartas topográficas na escala 1:25.000 (porção leste) e outras 313 cartas na escala 1:50.000. A definição da resolução da grade seguiu a proposta de complexidade do terreno de Hengl (2006), optando-se por células de 20 m.

A partir do MDE foram calculados dez atributos geomorfométricos derivados (tabela 1), de primeira e segunda ordem (Wilson e Gallant, 2000), locais e regionais (Olaya, 2009), que serviram como base para a construção do mapa geomorfológico apoiado na combinação de parâmetros quantitativos.

Para todas as classificações foram removidos os agrupamentos inferiores a 25 células contíguas, equivalente a 10000 m², adequado ao nível de generalização da escala e compatível com a área mínima para representação de objetos

equivalente às formas de relevo (ordem VI) de Tricart (1965) e à transição entre microrelevo e mesorelevo de Dikau (1989).

Parâmetros de classificação geomorfométrica

A construção do mapa geomorfológico amparado unicamente por parâmetros quantitativos foi realizada com base na discretização e combinação dos atributos geomorfométricos. Aplicou-se uma abordagem orientada ao objeto, incluindo características morfogenéticas, morfocronológicas, morfográficas, morfométricas e morfodinâmicas.

Essa etapa marcou a transição da geomorfometria geral, com o tratamento de dados contínuos dos atributos geomorfométricos, para a geomorfometria específica, com a definição de objetos discretos. Buscou-se, assim, de modo supervisionado, extrair medidas descritivas para feições e processos particulares da superfície terrestre, com base no conceito de assinatura geométrica (PIKE, 1988).

Tabela 1 - Atributos geomorfométricos utilizados na modelagem.

Atributo geomorfométrico	Ordem / Cálculo	Referência do cálculo
Altimetria	Zero (MDE) / Regional	Hutchinson (1989)
Declividade	Primário / Local	Horn (1981)
Relevo sombreado	Primário / Local	Horn (1981)
Perfil de curvatura	Primário / Local	Zevenbergen e Thorne (1987)
Área de contribuição	Primário / Regional	Tarboton (1997)
Índice de Posição Topográfica (IPT)	Primário / Regional	Wilson e Gallant (2000) e Weiss (2001)
Black Top Hat (BTH)	Primário / Regional	Rodriguez et al. (2002)
White Top Hat (WTH)	Primário / Regional	Rodriguez et al. (2002)
Índice Topográfico de Umidade (ITU)	Secundário / Composto	Beven e Kirkby (1979) e Quinn et al. (1991)
Índice de Potência do Escoamento (IPE)	Secundário / Composto	Moore et al. (1988)

Morfogênese

A definição conceitual das classes morfogenéticas foi baseada na concepção de mapas geomorfológicos poloneses (Klimaszewski, 1963a; 1963b) e alemães (Leser; Stäblein, 1975), nos quais a morfogênese representa um agrupamento das formas a partir de sua origem e evolução em relação aos agentes genéticos e processos atuantes em comum. Considerou-se, também, a concepção de Demek (1967), na qual um complexo de agentes contribui para a gênese da maioria das formas de

erosão-denudação, porém, um dos fatores normalmente predomina sobre os outros, sendo normalmente decisivo para o desenvolvimento das formas.

A partir das características geomorfológicas da área de estudo foram definidas três classes com ocorrência registrada (dentre as quinze principais) para as etapas de modelagem geomorfométrica: morfogênese fluviomarinha, morfogênese fluvial e morfogênese denudacional. Para cada classe

morfogenética foi atribuído um processo morfogenético predominante, conforme denominação de Klimaszewski (1963a; 1963b; 1990), cujos processos podem ser construtivos (agradacionais) e destrutivos (degradacionais). Para a classificação foram utilizados quatro atributos geomorfométricos, de acordo com a tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros geomorfométricos para a modelagem da morfogênese.

Morfogênese	Parâmetros	Processo morfogenético	Parâmetros
Fluviomarinha	Hipsometria < 20 metros	Destrutivo	TPI (raio de 500 metros) > 0
		Construtivo	TPI (raio de 500 metros) < 0
Fluvial	Hipsometria > 20 metros;		
	a) Área de contribuição > 1km ² ;	Destrutivo	Declividade > 8% ou área de contribuição > 1km ²
	b) TPI (raio de 100 metros) < - 1 desvio padrão;		
	c) TWI > média e TPI (raio de 500 metros) < - 1 desvio padrão;	Construtivo	Declividade < 8% e área de contribuição < 1km ²
	d) TWI > média e TPI (raio de 500 metros) > - 1 desvio padrão e < 0 e TPI (raio de 5000 metros) < 0		
Denudacional	Soma de todos os segmentos não contemplados pela morfogênese fluviomarinha e fluvial	Destrutivo	TPI (raio de 500 metros) > 0
		Construtivo	TPI (raio de 500 metros) < 0

Morfocronologia

A indicação da morfocronologia foi realizada por meio da reconstituição de paleosuperfícies a partir da análise de vizinhança dos valores altimétricos com o atributo geomorfométrico Black Top Hat (BTH), cujo tamanho da janela móvel foi atribuído a partir de uma relação têmporo-espacial estimada. Os remanescentes preservados na paisagem dessas paleosuperfícies foram modelados pelos atributos TPI e declividade.

O BTH foi utilizado como base para estimativa de taxas de denudação e incisão de vales por Rodríguez et al. (2002), Riquelme et al. (2008) e Luo et al. (2015), cuja janela móvel foi definida em função da distância média dos objetos a serem extraídos. Entretanto, neste trabalho, buscou-se estabelecer parâmetros relacionais entre a escala espacial e temporal das feições geomorfológicas numa perspectiva generalista e padronizada. Sob a premissa de que há correlação direta entre a extensão das formas de relevo e o tempo necessário para sua formação, utilizou-se como referência a proposta taxonômica de Tricart (1965), que

vinculou valores de área ao tempo aproximado de permanência das feições na paisagem.

A proposta pode ser dividida em cinco passos metodológicos: i) escolha das idades das paleosuperfícies a serem modeladas; ii) vinculação das idades com as áreas de acordo com a taxonomia de Tricart (1965); iii) definição do tamanho da janela móvel para cálculo do atributo BTH a partir da área adotada como referência; iv) modelagem das paleosuperfícies, incluindo os remanescentes e terraços; v) avaliação dos modelos obtidos, considerando datações geocronológicas e mensurações de taxas de denudação de longo termo em porções geomorfológicas representativas do estado do Paraná, publicados por Salgado et al. (2007), Riffel (2012), Riffel et al. (2015), Riffel et al. (2016) e Couto et al. (2018).

A adoção dos recortes temporais para as paleosuperfícies teve como referência os estudos de Bigarella et al. (1965) e Bigarella (2007), cuja interpretação sobre as superfícies aplanadas na porção leste do Paraná contempla três pediplanos (Pd3, Pd2 e Pd1) e dois níveis de pedimentos embutidos (P2 e P1). Os pediplanos foram

elaborados durante o Eoceno (Pd3), Mioceno Superior a Plioceno Inferior (Pd2) e Plio-Pleistoceno (Pd1), enquanto os pedimentos correspondem às glaciações quaternárias Kansan (P2) e Illinoian (P1). Os parâmetros constam na tabela 3.

A avaliação dos modelos morfocronológicos foi realizada a partir da comparação com mensurações e datações amostrais publicadas em porções representativas da área de estudo. Em relação aos trabalhos que mensuraram taxas de denudação utilizando nuclídeos cosmogênicos ^{10}Be coletados em sedimentos aluviais, utilizou-se como referência o trabalho de Couto et al. (2014), na região noroeste do Terceiro Planalto, e Salgado et al. (2014), na região da Serra do Mar com a inclusão do reverso da escarpa no Primeiro Planalto. Para essas porções foi possível estabelecer um parâmetro quantitativo entre os modelos e as estimativas de erosão in situ, a partir da subtração entre os MDEs das paleosuperfícies e

o MDE da superfície atual, dividindo o resultado pela idade da paleosuperfície para obtenção do valor em metros por milhões de anos (m/Ma).

Também foram utilizados trabalhos de datação geocronológica que, embora não estimem taxas de denudação, indicam a idade de remanescentes de antigas superfícies. Riffel (2012) e Riffel et al. (2015), com base numa combinação entre os métodos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ por aquecimento gradual a laser e geocronologia (U–Th)/He, dataram grãos de oxihidróxidos Mn supergênicos em perfis lateríticos em pontos amostrais na Serra do Mar (Serra do Quiriri), Primeiro Planalto (Bacia e Segundo Planalto (feições ruiformes do Parque de Vila Velha). Na região dos derrames basálticos, em Guarapuva, Riffel et al. (2016) dataram grãos de goethita em concreções ferruginosas in situ pelo método (U–Th)/He. Por fim, as paleosuperfícies modeladas foram comparadas com o conjunto de datações apresentados.

Tabela 3 - Parâmetros para a elaboração dos modelos de paleosuperfícies.

Idade da paleosuperfície poligenética	Superfície de referência (Bigarella et al., 1965)	Taxonomia de Tricart		Janela móvel para cálculo do BTH	Limiar hipsométrico	Nova atribuição
		Parâmetro temporal (anos)	Parâmetro espacial (km^2)			
0,25 Ma	P ₁	$10^{5,4}$	$10^{-1,7}$	140m x 140m	> 20m	T ₁
0,5 Ma	P ₂	$10^{6,7}$	10^{-1}	300m x 300m	> 20m	T ₂
5 Ma	Pd ₁	$10^{6,7}$	10	3km x 3km	> 300m	Ps ₁
15 Ma	Pd ₂	$10^{7,2}$	10^2	10km x 10km	> 500m	Ps ₂
50 Ma	Pd ₃	$10^{7,7}$	$10^{3,5}$	60km x 60km	> 800m	Ps ₃

Morfografia

A representação morfográfica identificou seis feições, subdivididas conforme características específicas: i) vales (segmentados em vales planos, abertos e fechados), topos (convexos e aguçados), cristas, planícies de inundação (fluviais e fluviomarinhas), terraços (remanescentes de paleosuperfícies e fluviomarinhas) e cones de dejeção (pequenos, intermediários e grandes). Os parâmetros são apresentados na tabela 4.

Morfometria

A morfometria foi o aspecto que embasou toda a construção do mapeamento geomorfológico, com a atribuição de parâmetros morfométricos para caracterizar as demais categorias geomorfológicas.

Como itens específicos do mapa principal foram incluídos: pontos cotados e curvas de nível,

a indicação da elevação acima do nível de base local e o relevo sombreado como camada subjacente ilustrando a rugosidade e profundidade do relevo. De modo auxiliar foram acrescentados cartogramas da elevação, declividade e ITU, apresentados em perspectiva tridimensional como complemento no layout dos mapas.

Morfodinâmica

Para a morfodinâmica, entendida como o conjunto de processos potencialmente atuantes nas formas de relevo, a modelagem enfatizou os processos erosivos adequados à escala regional. Objetivou-se definir pontos de suscetibilidade à corrida de detritos e representar, esquematicamente, a erosão potencial.

A suscetibilidade à corrida de detritos foi modelada conforme procedimentos semelhantes aos dos cones de dejeção. Os locais suscetíveis

foram compreendidos como pontos iniciais de segmentos lineares extensos (superiores a 2 km), definidos pela área de contribuição ($> 1 \text{ km}^2$), que possuem alta declividade média ($> 15\%$) e grande amplitude altimétrica ($> 250 \text{ m}$). A partir desses parâmetros mínimos de ocorrência foi realizada uma subdivisão com base na amplitude altimétrica

dos segmentos para determinar classes qualitativas de suscetibilidade: i) suscetibilidade moderada, com amplitude entre 250 e 350m; ii) suscetibilidade alta, com amplitude entre 350 e 500 m; iii) suscetibilidade muito alta, com amplitude altimétrica superior a 500 m.

Tabela 4 - Parâmetros geomorfométricos para a modelagem da morfografia

Morfologia	Segmentação	Parâmetros
Vales	Vales planos	AC $> 1 \text{ km}^2$ e BTH (raio de 100 metros) < 1 desvio padrão
	Vales abertos	AC $> 1 \text{ km}^2$ e BTH (raio de 100 metros) > 1 e < 3 desvios padrões
	Vales fechados	AC $> 1 \text{ km}^2$ e BTH (raio de 100 metros) > 3 desvios padrões
Topos	Topos convexos e interfluviais	WTH (raio de 100 metros) > 1 desvio padrão (em morfogênese denudacional de processo morfogenético destrutivo)
	Topos aguçados	WTH (raio de 100 metros) > 6 desvios padrões (em morfogênese denudacional de processo morfogenético destrutivo)
Cristas	-	WTH (raio de 100 metros) > 2 desvios padrões e extensão $> 1 \text{ km}$
Planície de inundação	Fluvial	Declividade $< 3\%$ (em morfogênese fluvial)
	Fluviomarinha	BTH (raio de 500 metros) > 2 e altimetria < 20
Terraços	Remanescente de paleosuperfície	TPI > 0 e declividade $< 3\%$ em morfogênese denudacional de processo morfogenético destrutivo (associado aos modelos das paleosuperfícies)
	Fluviomarinho	Perfil de curvatura < -0.005 (com extensão mínima de 500 metros) e altimetria < 20
Cones de dejeção	-	a) Segmentos lineares definidos pela área de acumulação $> 1 \text{ km}^2$;
		b) Pontos de interseção com declividade $< 8\%$;
		c) Amplitude da declividade média dos segmentos $> 8\%$;
		c) Amplitude altimétrica dos segmentos $> 60 \text{ m}$;
		(cones pequenos: amplitude altimétrica $> 60 \text{ m}$ e $< 100 \text{ m}$);
		(cones intermediários: amplitude altimétrica $> 100 \text{ m}$ e $< 200 \text{ m}$);
		(cones grandes: amplitude altimétrica $> 200 \text{ m}$)

A indicação da erosão potencial, por sua vez, foi alocada como cartograma adicional ao mapa. Utilizou-se como parâmetro o atributo geomorfométrico Índice de Potência do Escoamento vinculado a um índice não topográfico, considerando dados climáticos do acervo WorldClim, versão 1.4 (HIJMANS et al., 2005), que consiste num conjunto de dados matriciais, com resolução espacial de 1 km, referentes à precipitação e temperatura. O denominado índice de erosividade climática foi calculado seguindo metodologia elaborada pelo projeto de "riscos de erosão de solos", dentro do programa CORINE (1992) da União Europeia. Segundo Alonso et al. (2010), esse índice é resultado da combinação entre o índice de Fournier-Arnoldus, que mensura a agressividade climática, e o índice ombrotérmico de Bagnouls-

Gausse, calculado a partir do balanço de umidade mensal que mensura a aridez climática.

Etapas de conferência em campo

Para a verificação em campo dos resultados obtidos, foram coletadas fotografias georreferenciadas em pontos representativos do relevo, obtidas no nível do solo e também em voos realizados com um drone, modelo DJI Phantom 3. Além disso, foi realizado um acompanhamento em tempo real durante o deslocamento pelas estradas nas etapas de campo, utilizando-se de um GPS Garmin (modelo GPSmap 76CSx) acoplado a um netbook para a visualização dos resultados pelo software ArcGIS 10.1. Para esse procedimento, foi utilizada a extensão DNR Garmin.

Ao todo, conforme ilustrado pela figura 2, foram 323 pontos de análise (com 25 voos de drone) e quase 9000 km percorridos, com

acompanhamento em tempo real do mapeamento resultante no estado do Paraná.

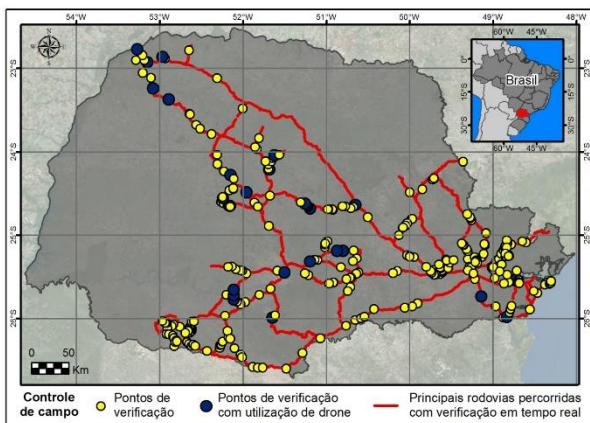


Figura 2 – Campanhas de campo da pesquisa.

Sistema de legenda

O sistema de legenda do mapeamento geomorfológico foi criado de modo concomitante à etapa prévia de análise de mapas geomorfológicos, que auxiliou na escolha das nomenclaturas, objetos geomorfológicos, cores e símbolos. A transcrição gráfica, pelo software ArcGIS 10.1, foi baseada na proposta de Maillard et al. (2011), que compilou alguns elementos de mapas geomorfológicos suíços, alemães e franceses, como os símbolos dos vales, cristas, cones de dejeção e corridas de detritos.

O sistema de legenda proposto é, portanto, híbrido, pois reúne contribuições que foram adaptadas de várias escolas de mapeamento geomorfológico, principalmente a alemã (cores da morfogênese), a polonesa (com a adoção dos termos “construtivo” e “destrutivo” para os processos morfogenéticos), a espanhola (representação da morfocronologia pela variável visual orientação ou textura, com transparência), a suíça (para alguns elementos morfográficos) e a italiana (alguns símbolos e cartogramas adicionais). O sistema de legenda proposto é aberto, pois pode ser complementado com informações adicionais, conforme a ocorrência de formas e processos geomorfológicos em outras localidades.

Resultados e discussões

Mapeamento geomorfológico

Os resultados apresentados a seguir exemplificam a proposta de mapeamento geomorfológico, utilizando critérios exclusivamente morfométricos a partir de uma base planialtimétrica, cuja classificação foi amparada pela modelagem digital para representar os aspectos geomorfológicos elementares de modo padronizado.

Na Planície Litorânea, o efeito escavado que as feições lineares de hidrografia conferiram ao MDE propiciou identificar: i) pequenas rupturas de declive, cujos segmentos convexos contínuos, em perfil de curvatura, foram definidos como bordas de terraços fluvio-marinhos; ii) porções mais rebaixadas, interpretadas como planícies de inundação; iii) vales dos rios da planície fluvio-marinha. Além dessas feições morfológicas, a hidrografia como dado de entrada no MDE foi fundamental para a distinção de processos morfogenéticos, já que as porções interfluviais, de posição mais elevada que o entorno, foram definidas como destrutivas, e as porções inferiores como construtivas. Muitas áreas mapeadas como processo morfogenético construtivo correspondem às depressões intercordões, que constituem áreas alagadas em depressões rasas, estreitas e alongadas.

No contato entre a Planície Litorânea e as montanhas da Serra do Mar, a figura 3 traz um exemplo de evento morfodinâmico recente, deflagrado no ano de 2011, que evidencia a relação entre os processos erosivos e a formação da planície, na qual o aporte sedimentar é destacado pelos cones de dejeção e planícies de inundação. Nesse evento, caracterizado como um conjunto de escorregamentos cujo material desprendido foi transportado pelos vales na forma de corridas de detritos (Silveira et al., 2013; 2014), observações in loco contabilizaram até 70 cm de espessura de material depositado na planície. No mapa resultante, observa-se que as áreas delimitadas como processo morfogenético destrutivo correspondem às áreas de cicatrizes dos escorregamentos e também aos topos interfluviais secundários. Os vales onde o material convergiu foram mapeados como processo morfogenético fluvial destrutivo, enquanto as porções sobrejacentes preservadas, que indicam os depósitos coluviais de antigos escorregamentos, foram mapeadas como processo morfogenético denudacional construtivo.

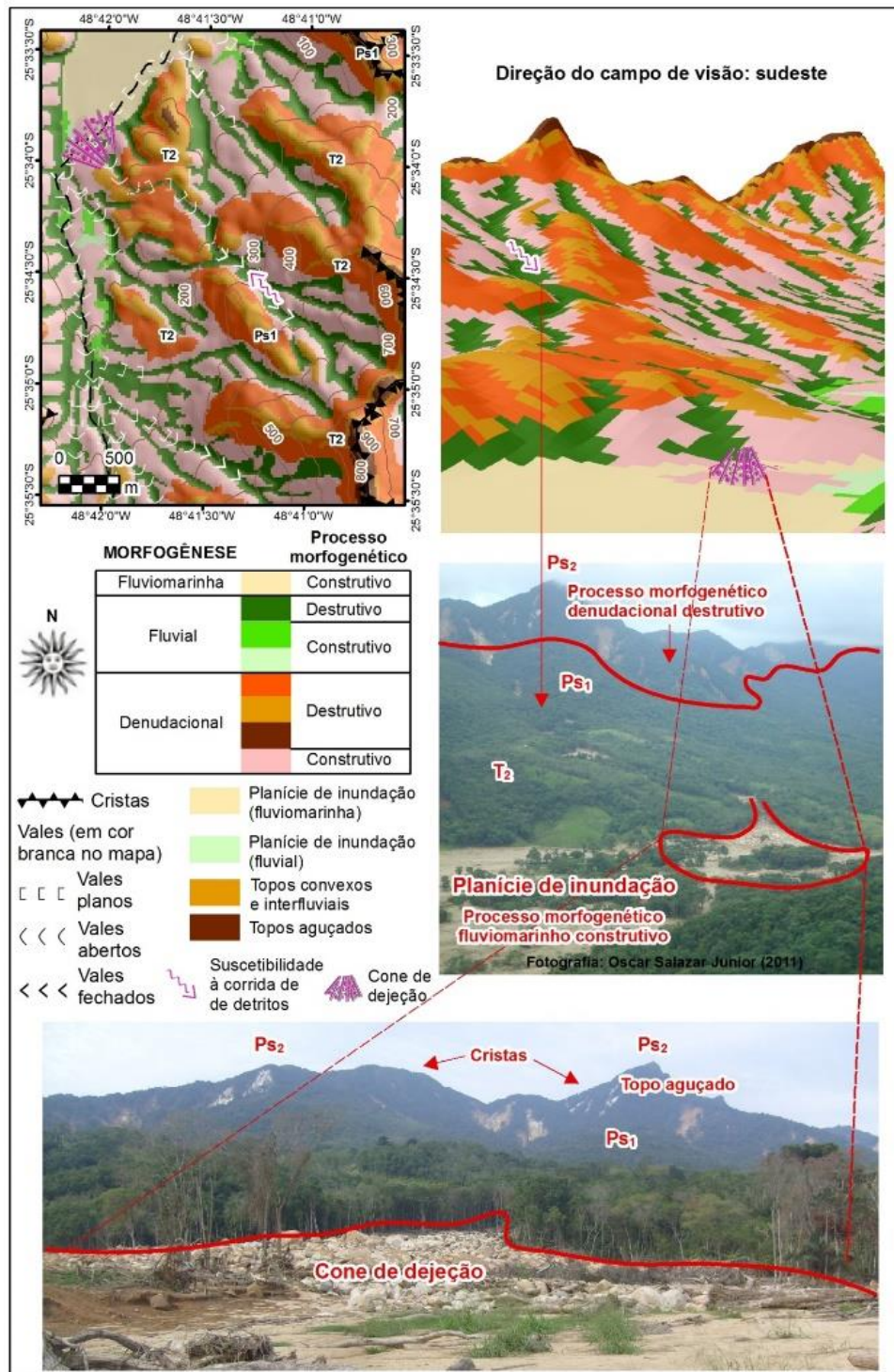


Figura 3 – Resultados do mapeamento na Serra da Prata em relação ao evento de 11/03/2011.

Nas elevações montanhosas sustentadas por intrusões graníticas, o processo morfogênético destrutivo foi delimitado na ruptura de curvatura e declive derivada da erosão diferencial no contato com rochas metamórficas do Complexo Gnáissico-Migmatítico. O recorte da figura 4, na Serra do

Ibitiraqure, com as maiores altitudes do sul do Brasil (chegando a 1877 m), representa uma das porções da Serra do Mar mapeada com os maiores segmentos de cristas alongadas.

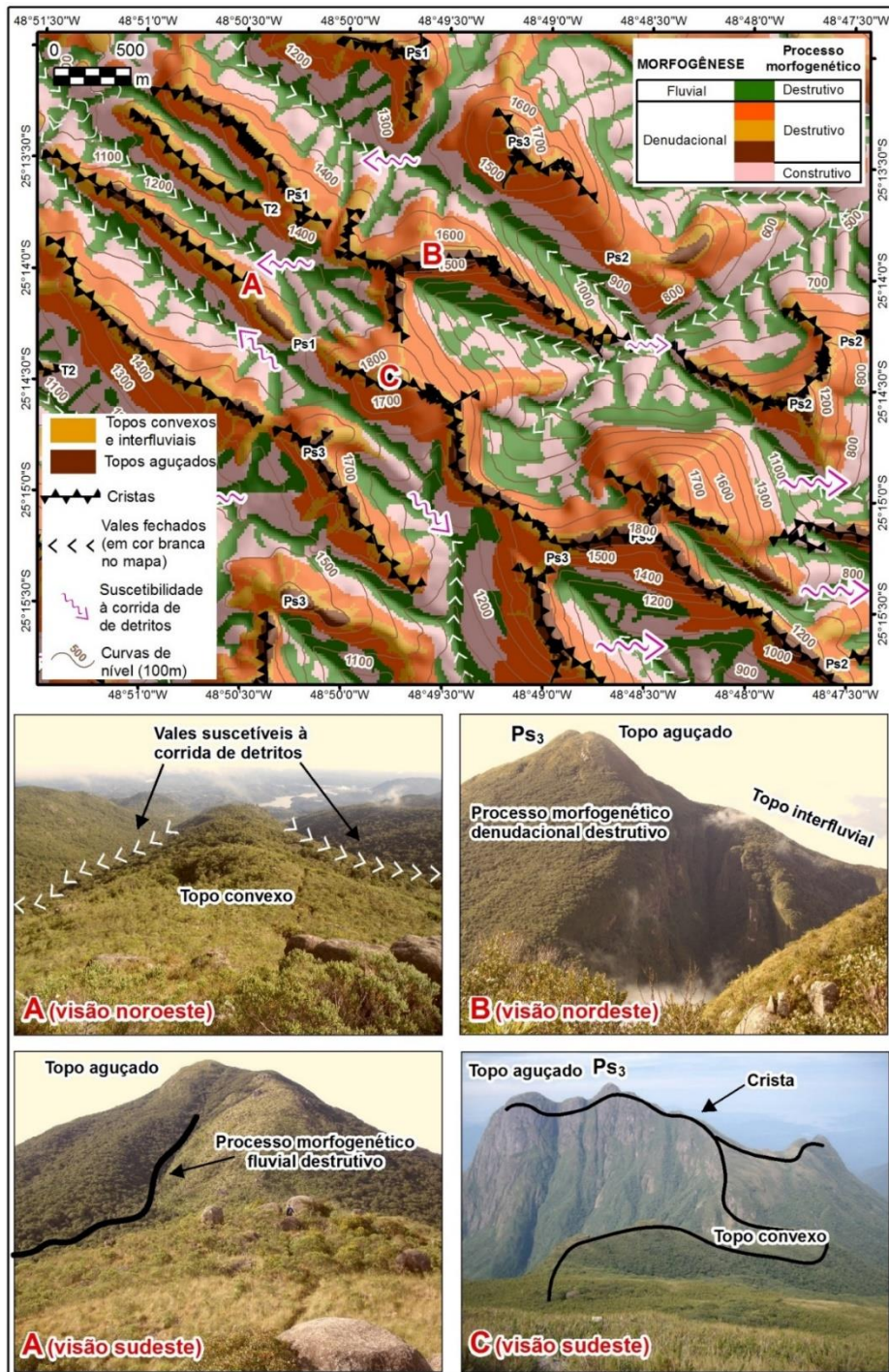


Figura 4 – Resultados do mapeamento na Serra do Ibitiraquire, com ênfase no Pico Paraná.

Todos os picos locais foram corretamente modelados com topos aguçados. Mesmo segmentos convexos individualizados em cristas com predomínio de topo aguçado tiveram a representação adequada (fotografia A e C). Em função da alta declividade da área e desníveis superiores a 600m, todos os vales foram mapeados como gênese fluvial destrutiva e na categoria de vales fechados, que demonstram a intensidade dos processos e energia do relevo. Como consequência,

a área também contou com grande suscetibilidade à corrida de detritos, assinalada em todos os canais de drenagem de segunda ordem.

Referente aos resultados da modelagem morfocronológica na Serra do Mar, embora se admita que seja um modelo simplificado, por considerar somente cálculos morfométricos regionais, ela possibilitou a representação quantitativa de modelos teóricos que trazem consigo subjetividades intrínsecas às próprias

discussões sobre a gênese das superfícies de aplanamento. Em todos os cenários modelados foi constatado o efeito da erosão diferencial no progressivo rebaixamento do relevo serrano, na abertura dos vales e na exposição dos remanescentes preservados que, atualmente, registram na paisagem antigos níveis erosivos. Considerando, inicialmente, os estudos realizados por Bigarella et al. (1965; 1978) e Bigarella (2007) sobre a evolução policíclica do relevo condicionada pelo clima no estado do Paraná e a formação de pediplanos, as idades estimadas para as paleosuperfícies e suas respectivas posições na paisagem condizem com a interpretação das superfícies aplanadas.

Em termos quantitativos, num comparativo entre os modelos morfocronológicos e a datação

geocronológica realizada na área (Salgado et al., 2014), os resultados tabulados são apresentados pela tabela 5, na qual consta a denudação estimada pela concentração de ^{10}Be , para cada bacia, em relação às paleosuperfícies Ps3 (50 Ma), Ps2 (15 Ma) e Ps1 (5 Ma). Os resultados derivados da subtração entre cada paleosuperfície e o MDE da superfície atual, dividida pela idade atribuída, demonstraram equivalência e proporcionalidade quantitativa. Considerando o conjunto total de bacias, a taxa de denudação utilizada como referência foi de $18,57 \pm 1,12$ m/Ma e todos os cenários modelados se aproximaram desse valor, indicado no intervalo entre as taxas médias e máximas calculadas.

Tabela 5 - Resultados das estimativas de taxas de denudação na Serra do Mar.

Recortes		Estimativa de taxa de denudação						
		Salgado <i>et al.</i> (2014) (m/Ma)	Ps ₃ (50 Ma)		Ps ₂ (15 Ma)		Ps ₁ (5 Ma)	
			Média (m/Ma)	Máximo (m/Ma)	Média (m/Ma)	Máximo (m/Ma)	Média (m/Ma)	Máximo (m/Ma)
Área total	Média	$18,57 \pm 1,12$	13,56	20,57	7,68	23,88	12,78	49,9
Sub-bacias hidrográficas do rio Ribeira	C1	$8,3 \pm 0,3$	7,8	12,5	2	5,0	4,7	14,8
	C2	$8,1 \pm 0,28$	7,4	12,5	4,9	14,8	14,4	44,6
	C3	$13,2 \pm 0,47$	12	13,0	4,1	6,6	8,0	17
	C4	$12,4 \pm 0,39$	10,2	12,7	17,2	39,4	9,8	42,4
	C5	$13,5 \pm 0,41$	9,2	14,2	13	39,4	15,7	56
	Média	$11,1 \pm 0,37$	9,3	13	8,2	21,0	10,5	35,0
Sub-bacias hidrográficas da Bacia Litorânea	O1	$29,9 \pm 1,39$	14,3	26,3	4,8	21	3,7	37,7
	O2	$15,5 \pm 0,51$	16,6	27,7	4,4	19,5	8,8	40,2
	O3	$47,7 \pm 5,65$	20,0	27,8	10,4	27,6	19,2	62,6
	O4	$17 \pm 1,13$	22,5	29,5	5,7	21,1	14,3	63,4
	O5	$20,1 \pm 0,71$	15,5	29,5	10,5	44,4	29,2	120,2
	Média	$26 \pm 1,87$	17,8	28,2	7,2	26,7	15,0	64,8

A figura 5 ilustra a atribuição das paleosuperfícies na Serra do Mar, cujo ponto de tomada da fotografia marca o limite entre a bacia hidrográfica litorânea e do planalto, próximo às bacias analisadas por Salgado et al. (2014). No caso representado, a diferença de altitude entre a Ps3 e a Ps1 foi de 450 m, o que representou, na área, uma taxa média de denudação de 10 m/Ma entre 50 Ma e 5 Ma. Entre a Ps1 e a T2, que contempla todos os topos convexos inferiores, a amplitude média de

200m indicou uma taxa de denudação de 40 m/Ma entre 5 Ma e 500 mil anos. Sub-bacias hidrográficas analisadas que possuem características geomorfológicas semelhantes às do recorte elucidado tiveram resultados semelhantes, como a C4 ($12,4 \pm 0,39$) e O3 ($47,7 \pm 5,65$).

No Primeiro Planalto, os resultados do mapeamento permitiram diferenciar os padrões de relevo da porção norte e porção sul. Isso se deve à diversidade litológica e ao efeito do nível de base,

já que o rio Ribeira (porção norte) está mais próximo ao oceano e com maior desnível altimétrico do que o rio Iguaçu (porção sul), que tem seu curso para o interior do continente.

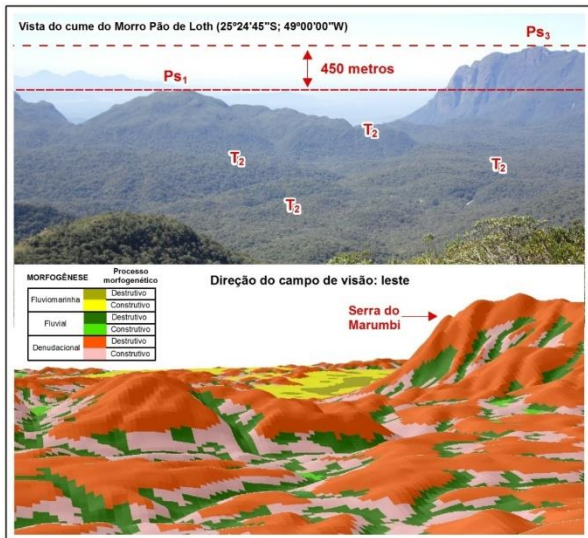


Figura 5 – Morfogênese e paleosuperfícies representadas por topos na Serra do Marumbi (Ps₃) e Graciosa.



Figura 6 – Exemplo dos resultados do mapeamento na bacia hidrográfica do rio Ribeira, em relevo dissecado (norte do Primeiro Planalto Paranaense).

Os contrastes são bem evidenciados na figura 6 (exemplo da bacia do Ribeira) em relação à figura 7 (exemplo da bacia do Iguaçu). Como se observa, o processo morfogenético fluvial destrutivo, a norte, ocupa toda a extensão dos vales, enquanto a sul se limita aos talvegues.

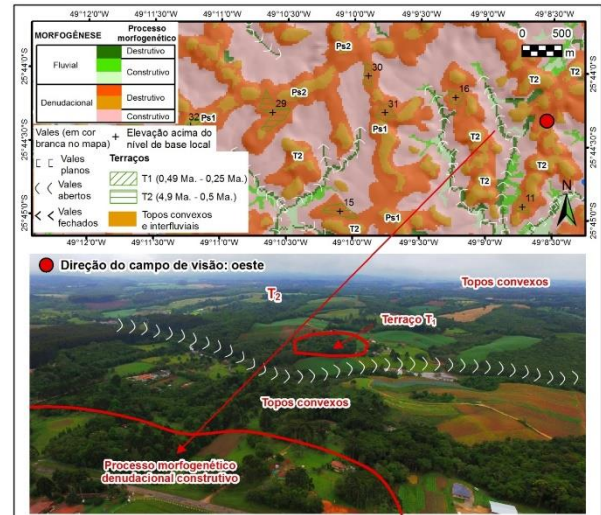


Figura 7 - Exemplo dos resultados do mapeamento na bacia hidrográfica do rio Iguaçu, (sul do Primeiro Planalto Paranaense).

Outras distinções foram destacadas em relação aos objetos morfográficos mapeados. Na porção norte do Primeiro Planalto, 18% das áreas modeladas como topos foram classificadas como aguçado, enquanto na porção sul esse valor foi de apenas 1,5%. Para as linhas de cristas os resultados foram ainda mais discrepantes: densidade de 1,7 km/km² no Ribeira e de 0,06 km/km² no Iguaçu. No primeiro caso, as cristas estão associadas principalmente aos enxames de diques de diabásio de idade Juro-Cretácea alongados na direção SE-NW e aos quartzitos do Proterozoico Superior que sustentam topos aguçados na direção SW-NE. No segundo, as cristas se concentram nos mencionados blocos soerguidos do reverso da escarpa erosiva da Serra do Mar.

Os objetos mapeados no Segundo Planalto foram condizentes às características e variações litológicas. Em síntese, a tabela 6 apresenta os resultados quantificados dos principais objetos geomorfológicos modelados em relação aos grupos geológicos condizentes às sucessões sedimentares definidas por ciclos transgressivo-regressivos ligados às oscilações do nível relativo do mar no Paleozoico.

Tabela 6 - Quantificação dos objetos mapeados para cada grupo geológico do Segundo Planalto Paranaense.

Objetos geomorfológicos		Grupo Paraná		Grupo Itararé	Grupo Guatá	Grupo Passa Dois
		Formação Furnas	Formação Ponta Grossa			
Área (km ²)		3557,3	2174,5	14063	4471	15528,8
Morfogênese fluvial (% relativa)	Destrutivo	13,9	10,9	13,7	11,3	15,1
	Construtivo	5,2	10,2	7,8	11,6	11
Morfogênese denudacional (% relativa)	Destrutivo	54,7	55,7	51,8	51,9	47,8
	Construtivo	26,2	23,2	26,7	25,2	26,1
Vales planos (m / km ²)		140	170	150	240	260
Vales abertos (m / km ²)		480	280	380	360	330
Vales fechados (m / km ²)		330	180	300	160	350
Cristas (m / km ²)		15,9	9,4	57,7	49,2	361,8
Topos convexos (% relativa)		3,4	3	9,1	7,7	14,3
Topos aguçados (% relativa)		0,06	0,02	0,1	0,12	0,93
Terraços e remanescentes de paleosuperfícies (% relativa)		7	7,5	3,4	4,5	4
Cones de dejeção (número de feições / km ²)		0,4	0,09	0,1	0,2	0,7
Planície de inundação (% relativa)		1,2	2,6	2,4	4,3	5
Pontos suscetíveis a corrida de detritos (por km ²)		0,11	0	0	0	0,01
Declividade média (em %)		12,4	10,1	13,4	11,7	15,7
Amplitude altimétrica		814	732	725	632	851
Taxa de denudação média nos últimos 5 Ma (em metros)		35,1	33,8	42,8	39,5	52,6

Na transição do Primeiro para o Segundo Planalto, a figura 8 ilustra o mapeamento em segmentos da escarpa da bacia sedimentar e nas porções adjacentes. Em relação à morfogênese, o modelo classificou o front erosivo, incluindo a cornija, como morfogênese denudacional destrutiva, enquanto os depósitos de tálus, na base, foram mapeados com morfogênese denudacional construtiva.

Próximo à transição da bacia sedimentar com a escarpa basáltica há muitas feições testemunhas da Formação Serra Geral. Como ilustrado na figura 9, os morros isolados constituem formas de destaque. Os morros são mantidos por topos basálticos, que a partir da modelagem foram mapeados com topos aguçados e referente à Ps2 (49 Ma a 15 Ma). Observa-se que tais morros apresentam uma convexidade nas vertentes intermediárias que o mapeamento corretamente atribuiu ao processo morfogenético destrutivo, ocorrendo a concavidade somente nos fundos de vale, mapeados como processo fluvial destrutivo.

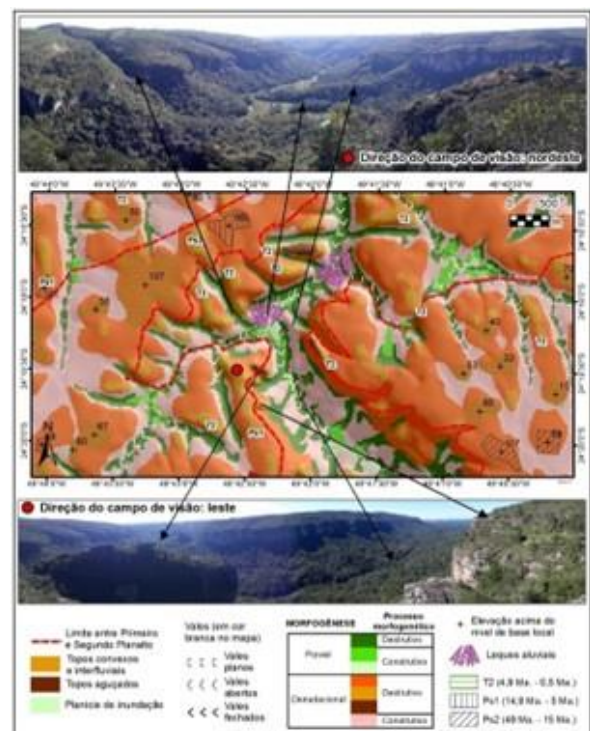


Figura 8 – Escarpa do Segundo Planalto.

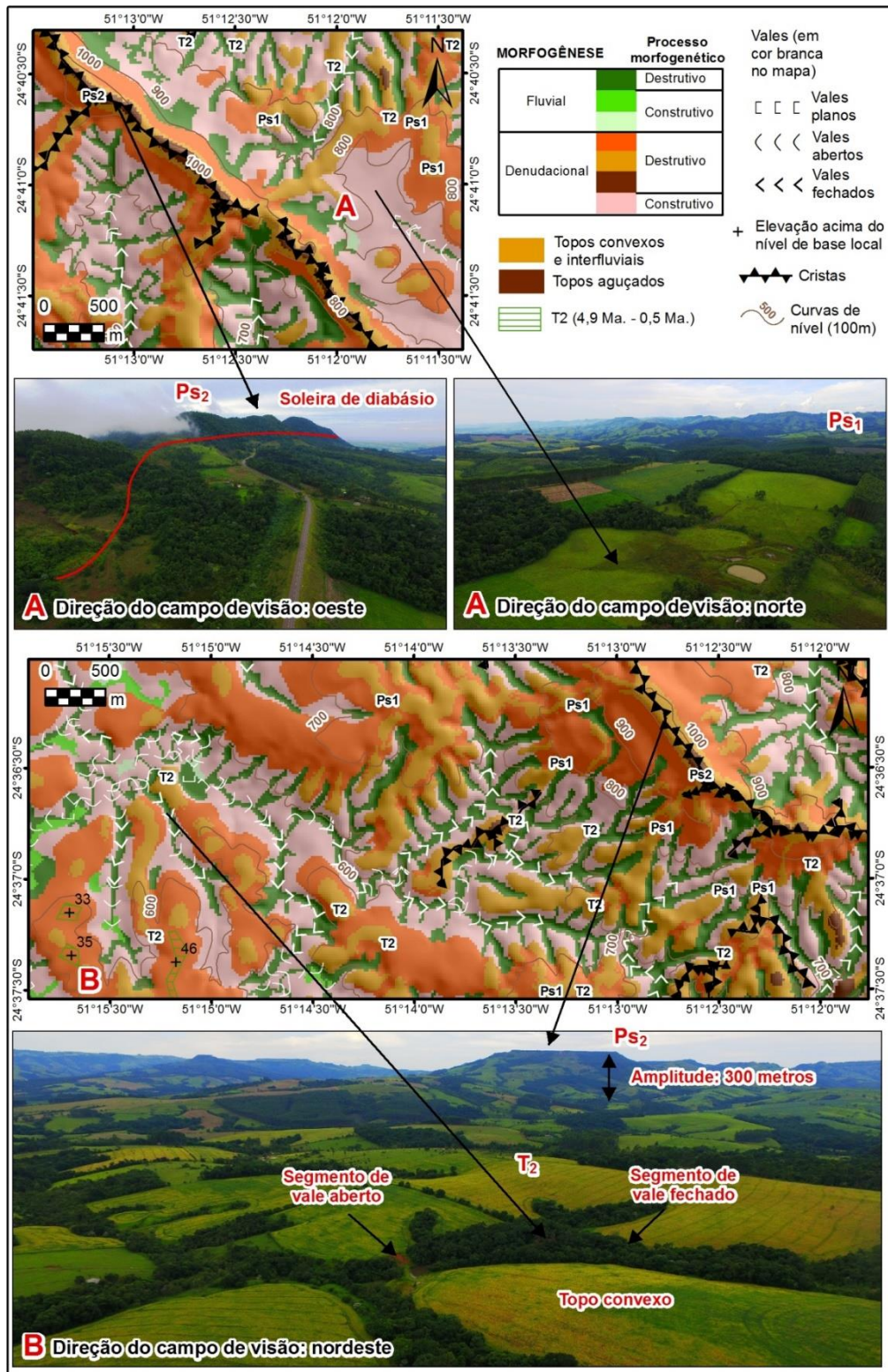


Figura 9 – Exemplo de resultados no Segundo Planalto com ênfase nas soleiras de diabásio

Ainda no front da escarpa, o sistema de drenagem instalado no rebordo, com vertentes convergentes, que provoca o recuo erosivo da feição, foi corretamente atribuído à morfogênese fluvial destrutiva, com áreas construtivas confinadas nos fundos de vale.

No reverso da escarpa, a mudança de relevo é abrupta. A resistência erosiva do arenito que sustenta a escarpa dificulta a incisão fluvial acentuada, formando vales planos ou abertos, como destacado no mapeamento. Prevalence, portanto, a morfogênese denudacional. E, apesar do relevo

plano, as reentrâncias do recuo erosivo resultam em alguns topos convexos ou mesmo segmentos de cristas localizadas em elevações cujas laterais foram dissecadas. Como exemplo desse processo, a figura 12 (na foto inferior, à esquerda) ilustra um morro testemunho com topo aguçado em meio às reentrâncias da escarpa.

No interior da bacia sedimentar, adentrando o Segundo Planalto, há a presença de intrusões básicas que se sobressaem na paisagem e que exercem influência nas relações de energia do entorno, tal como ilustrado pela figura 9. No primeiro recorte (figura 9A), a estrutura denudacional orientada a noroeste, com topo aguçado e extenso segmento de crista, é sustentado por uma soleira de diabásio. Nos sopés, há uma alternância entre as porções denudacionais construtivas, de vertentes divergentes, que recebem o material erodido a montante, e as fluviais destrutivas, de vertentes convergentes, que fazem o retrabalhamento desse material a partir das incisões verticais.

Reforça-se, aliás, principalmente no segundo recorte (figura 9B), o correto mapeamento das feições fluviais, cujos limites podem ser observados pela presença de vegetação ciliar ao longo dos rios. Dessa forma, em função do controle litológico, o contato vulcano-sedimentar resultou em feições proeminentes e entalhadas, com predomínio de vales fechados. No caso do dique de diabásio da figura 9B, o desnível altimétrico chega a 300 metros. Os topos vinculados às intrusões normalmente foram modelados como Ps2 (49 Ma a 15 Ma), enquanto os topos convexos da porção sedimentar receberam atribuição majoritária da T2 (4,9 Ma a 0,5 Ma).

Próximo à transição da bacia sedimentar com a escarpa basáltica há muitas feições testemunhas da Formação Serra Geral. Como ilustrado na figura 10, os morros isolados constituem formas de destaque. Os morros são mantidos por topos basálticos, que a partir da modelagem foram mapeados com topos aguçados e referente à Ps2 (49 Ma a 15 Ma). Observa-se que tais morros apresentam uma convexidade nas vertentes intermediárias que o mapeamento corretamente atribuiu ao processo morfogenético destrutivo, ocorrendo a concavidade somente nos fundos de vale, mapeados como processo fluvial destrutivo.

Referente ao Terceiro Planalto, a gênese desse grande compartimento geomorfológico se restitui aos fenômenos que levaram ao rift do Gondwana, no Cretáceo, com o decorrente evento vulcânico.

Aproximadamente 10% da Província Basáltica Continental está localizada no continente africano e os outros 90% na América do Sul, numa área de 1200000 km² que recobre parcialmente o Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai (WAICHEL et al., 2006).

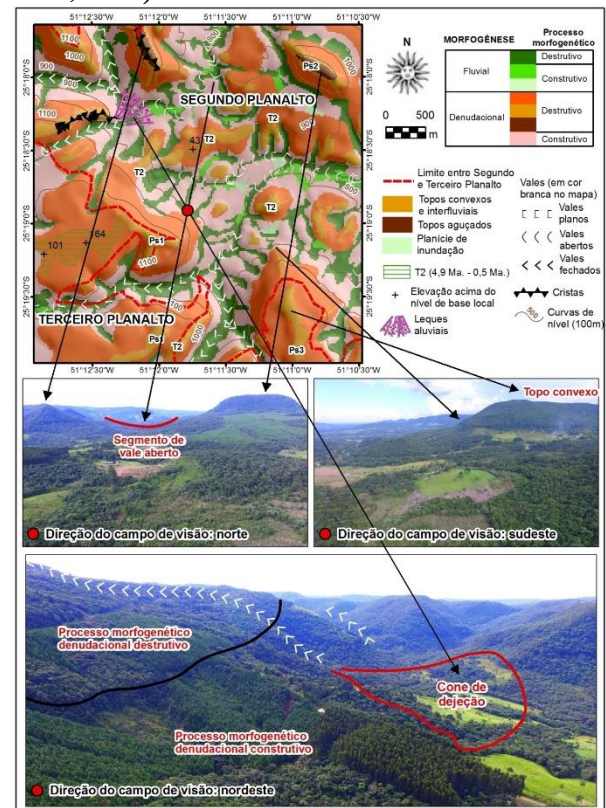


Figura 10 – Mapeamento na Serra da Esperança (Guarapuava), início do Terceiro Planalto.

Conforme Milani et al. (2007), na Bacia do Paraná, o evento foi caracterizado por uma espessa cobertura de lavas, diques de diabásio que cortaram a seção sedimentar e múltiplos níveis de soleiras intrudidas segundo os planos de estratificação dos sedimentitos paleozoicos.

Referente ao Terceiro Planalto, a gênese desse grande compartimento geomorfológico se restitui aos fenômenos que levaram ao rift do Gondwana, no Cretáceo, com o decorrente evento vulcânico. Aproximadamente 10% da Província Basáltica Continental está localizada no continente africano e os outros 90% na América do Sul, numa área de 1200000 km² que recobre parcialmente o Brasil, Paraguai, Argentina e Uruguai (WAICHEL et al., 2006).

Conforme Milani et al. (2007), na Bacia do Paraná, o evento foi caracterizado por uma espessa cobertura de lavas, diques de diabásio que cortaram a seção sedimentar e múltiplos níveis de soleiras

intrudidas segundo os planos de estratificação dos sedimentitos paleozoicos.

O mapeamento conseguiu identificar as principais feições e quebras de relevo associadas à morfogênese, sejam ocasionadas pelos níveis dos derrames, formando um relevo escalonado, sejam pelas diferenças das associações faciológicas da Formação Serra Geral. Em muitos casos, as porções com morfogênese denudacional destrutiva (incluindo os topos) podem ser vinculadas aos depósitos vulcanoclásticos, que por serem mais resistentes formam altos topográficos. As rupturas de declive normalmente estão associadas aos derrames de lavas intercalados e às interdigitações com os vulcanoclastos, que no mapeamento realizado condizem, grosso modo, às porções denudacionais construtivas. Os topos planos bem preservados foram mapeados como terraços ou remanescentes de paleosuperfícies, que marcam antigos níveis erosivos. A figura 11 exemplifica a paisagem característica da região em relação à modelagem.

Sobreposto aos derrames basálticos, na região noroeste do estado do Paraná, ocorre uma cobertura sedimentar arenosa depositada em ambiente árido no final do Cretáceo (Mineropar, 2001). Devido à fragilidade do solo derivado do arenito Caiuá, a região noroeste apresenta erosões hídricas lineares de grande dimensão, na forma de ravinas e voçorocas ativas. A suscetibilidade natural às feições erosivas, com ocorrência de voçorocas, pode ter sido potencializada pela própria ocupação iniciada em 1940, já que no projeto de colonização as cidades foram alocadas nos divisores d'água, cuja impermeabilização do solo concentra o fluxo hídrico acumulado nas adjacências das áreas urbanizadas, onde estão as áreas degradadas para o uso agrícola.

No município de Loanda, como exemplificado pela figura 12, constam notáveis voçorocas com quilômetros de extensão. Note-se, na figura 16, tanto pela fotografia quanto pelo mapeamento, que a feição erosiva já atinge a área urbana. Essa condição foi devidamente identificada na modelagem da erosão potencial (figura 12), como consta no encarte específico, cujo segmento linear com alto potencial de escoamento segue até o interflúvio. Ou seja, o mapeamento principal evidenciou a configuração atual do relevo e o encarte da erosão potencial inferiu um cenário para a dinâmica geomorfológica.

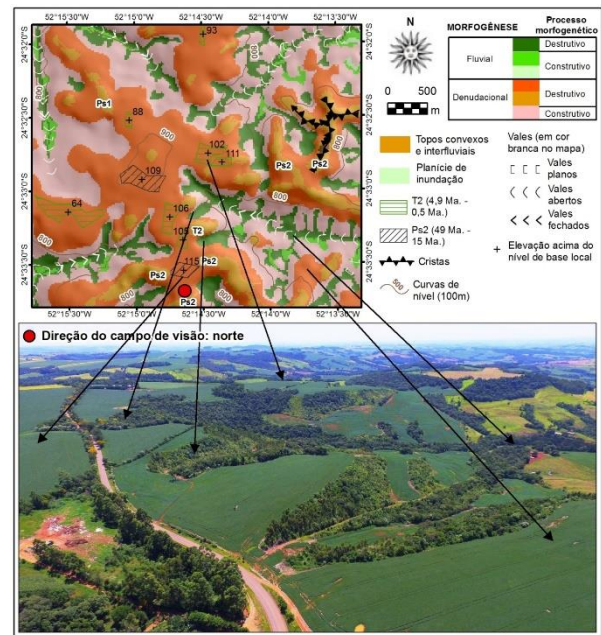


Figura 11 – Mapeamento na região de Roncador.

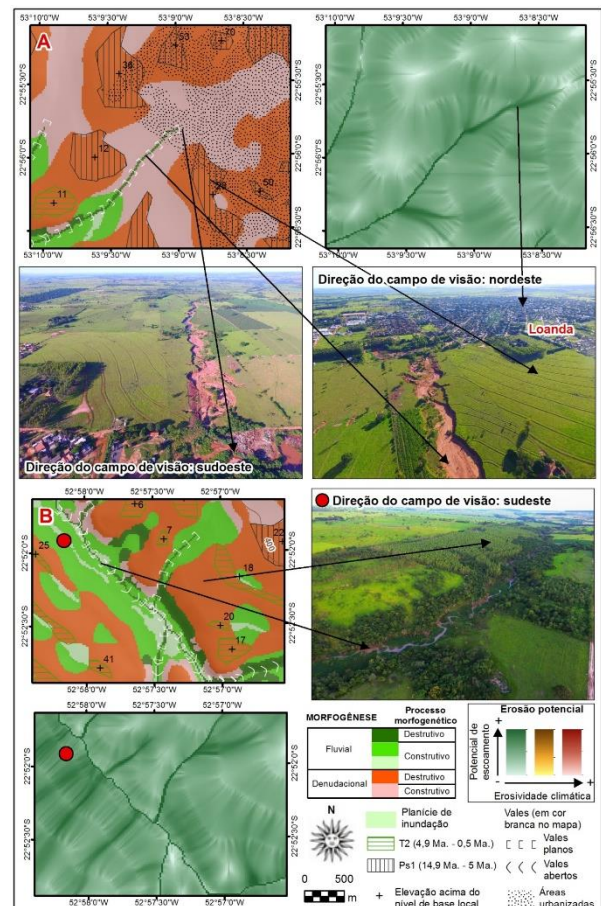


Figura 12 – Mapeamento e erosão potencial em Loanda, região noroeste.

Potencialidades e limitações da modelagem

A modelagem da morfogênese, subdividida em processos morfogenéticos, foi o elemento de destaque do mapeamento sob a perspectiva temática. A representação dos polígonos com cores ressaltou as classes referentes à origem e evolução do relevo. Dentre elas, a morfogênese fluviomarinha teve o critério mais simples para a delimitação, fixando-se à cota altimétrica de 20m. Os processos morfogenéticos, por sua vez, foram distinguidos pelo TPI com raio intermediário de 500m, nos quais os valores positivos indicaram as porções destrutivas e os valores negativos as porções construtivas.

Considerando a equidistância e o distanciamento entre as curvas de nível na Planície Litorânea, os bons resultados só foram possíveis, nessa escala, pela inclusão da hidrografia como dado de entrada na interpolação do MDE pelo método Topogrid, uma vez que o algoritmo proveu um sutil rebaixamento altimétrico próximo aos canais de drenagem. Por esse motivo, os limites dos processos morfogenéticos fluviomarinhas podem ser entendidos como uma representação aproximada. Como o mapeamento adotou uma perspectiva booleana, deve-se considerar, na interpretação, a tenuidade do limite entre as classes.

A modelagem da morfogênese fluvial, por sua vez, demandou a sobreposição de cinco regras de classificação. As feições fluviais têm características morfométricas distintas conforme o padrão de relevo, daí a necessidade de incluir tantos parâmetros a fim de contemplar os contrastes geomorfológicos do Paraná e refinar os limites das classes mapeadas.

Na modelagem dos processos morfogenéticos imbricados à morfogênese fluvial, considerou-se que as áreas com declividade superior a 8% (vertentes erosivas) ou área de contribuição superior a 1km² (canais de drenagem) caracterizam predomínio de processos destrutivos, enquanto nas áreas com parâmetros inversos ocorrem os processos morfogenéticos construtivos. Um erro comum de inclusão foi o mapeamento de processos construtivos em algumas cabeceiras de drenagem de relevo colinoso, cujas nascentes possuem baixa declividade. Outro erro detectado, nesse caso de omissão, condiz a alguns canais de primeira ordem, mapeados corretamente como morfogênese destrutiva, mas que não possuem conectividade com o rio principal. Nesses casos, as descontinuidades foram modeladas com

morfogênese denudacional construtiva. Erros pontuais, considerando a totalidade mapeada.

A última classe morfogenética modelada foi a denudacional, abarcando todas as áreas que não têm origem fluvial ou fluviomarinha, ou seja, com todos os parâmetros inversos. As observações em campo, em toda a área de estudo, destacaram a representatividade dos processos morfogenéticos. Contudo, verificou-se que há um grau de incerteza na transição entre os limites construtivos (interpretados como depósitos coluvionares, por exemplo) e destrutivos, que normalmente foram correlacionados às quebras do perfil de curvatura: vertentes convexas, no terço superior, indicam processos degradacionais e vertentes côncavas, no terço inferior, sinalizam processos construtivos.

Quanto aos objetos morfográficos modelados, os topos e as planícies de inundação foram vinculados à morfogênese, simbolizados por cores em polígonos. Por esse motivo, a informação aparece duplicada na legenda. O mapeamento dos topos pelo atributo WTH, com raio detalhado de 100m, foi adequado à escala pretendida. A discretização a partir dos valores de desvio padrão também teve resultados exitosos, partindo da premissa que quanto maior o valor do WTH, mais aguçado tende a ser o topo.

As planícies de inundação, em áreas de morfogênese fluvial, foram concebidas como feições planas, com declividade inferior a 3%, cujo parâmetro se mostrou representativo. A modelagem buscou representar os limites máximos de ocorrência de inundações no leito maior e com base em registros de inundações ocorridas, os limites modelados foram fidedignos.

Dentre todos os objetos morfográficos, a modelagem das cristas foi a que obteve a maior representatividade e, como consequência, o menor número de erros detectados. A parametrização foi semelhante à concebida para os topos, com o WTH, mas para as cristas os resultados da classificação matricial foram convertidos em vetores, como feições lineares, sendo atribuído um valor mínimo de extensão. Para a escala de 1:50.000 do mapeamento, o critério de extensão mínima de 1km dos segmentos foi satisfatório por indicar os principais segmentos de cristas sem sobrecarregar a representação do mapa em sua totalidade.

Outro destaque do mapeamento realizado se refere à modelagem dos vales. A área de contribuição delimitou os segmentos lineares de ocorrência, enquanto o BTH estimou a profundidade das feições. Assim como na classificação dos topos, que utilizou o WTH, a

morfologia foi considerada com análise regional e não local. Quanto maior a variação altimétrica entre o talvegue e o entorno próximo (nesse caso, 100m nas margens), mais encaixado é o vale.

Os cones de dejeção, por sua vez, foram modelados a partir de uma proposição metodológica cuja concepção reflete o raciocínio envolvido numa classificação geomorfométrica orientada a objeto. O mapeamento considerou a amplitude altimétrica e declividade média de segmentos de drenagem (definidos pela área de contribuição) e a declividade local nos pontos de interseção (confluência) entre esses segmentos. Assim, pontos localizados em áreas suavemente onduladas, com grande desnível altimétrico e quebra de declive dos rios, foram modelados como cones de dejeção.

A mesma lógica de classificação foi aplicada para mapear a suscetibilidade à corrida de detritos, sob a perspectiva da morfodinâmica. Com o emprego da área de contribuição para identificar as feições lineares de convergência hídrica, considerou-se que, quanto maior a declividade média e quanto maior a amplitude altimétrica desses segmentos contínuos, mais suscetíveis são ao transporte de materiais por movimentos gravitacionais na forma de escoamento rápido. Enquanto os cones de dejeção foram modelados nos pontos de interseção, a indicação dos locais suscetíveis foi atribuída aos pontos iniciais dos segmentos lineares da área de contribuição. Na Serra do Mar, onde o processo predominou, eventos recentes confirmaram sua eficiência.

Quanto à modelagem da morfocronologia, seja pelas datações geocronológicas e mensurações de taxas de denudação (recentes), seja pelos modelos conceituais (tradicionais), com interpretação a partir de evidências *in loco*, a modelagem das paleosuperfícies foi representativa em todo a área de estudo. Como o processo de erosão varia conforme o contexto litológico e, assim, algumas áreas não possuem topos testemunhos preservados, foi necessário incluir os limiares hipsométricos, que foram calibrados para a área de estudo. Nas comparações com os trabalhos de estimativa das taxas de denudação de Salgado et al. (2014) e Couto (2015), verificou-se que houve equivalência dos resultados da modelagem em todas as bacias hidrográficas com as datações de núclídeos cosmogênicos ¹⁰Be.

Conclusão

A proposta apresentada confirmou a hipótese da criação de um mapa geomorfológico, com todos seus aspectos essenciais (morfometria, morfografia, morfogênese, morfocronologia e morfodinâmica), utilizando-se apenas de parâmetros geomorfométricos derivados de um modelo digital do terreno. Foi comprovada, assim, a possibilidade de aplicação da análise digital do relevo como principal ferramenta metodológica para a cartografia geomorfológica.

A criação de regras de classificação unificadas para uma área extensa e com contextos geomorfológicos muito distintos demonstrou que a metodologia pode ser replicada para outras localidades. Reforça-se que a proposta é aberta e os parâmetros podem ser adaptados conforme características do MDE ou do relevo local. Além disso, os resultados consolidam a análise digital do relevo como alternativa acessível para o mapeamento geomorfológico de modo semiautomatizado.

Ressalta-se que a qualidade do MDE e o rigor metodológico durante a etapa de classificação orientada a objeto foram os fatores preponderantes para a eficácia da proposta. Quanto ao cálculo dos atributos geomorfométricos, salienta-se que a resolução da grade e a dimensão da janela móvel ou raio de análise de vizinhança influenciam diretamente nos resultados. Há, dessa forma, uma dependência escalar (têmporo-espacial) que deve ser compatibilizada com os objetivos do mapeamento.

Faz-se essencial, também, o reconhecimento prévio dos objetos a serem modelados e todas suas características de ocorrência na paisagem, para a eficiente transcrição quantitativa das feições e/ou processos. Quanto mais consistente for o embasamento teórico sobre o objeto e quanto maior for o rigor e a clareza metodológica acerca da parametrização, melhores serão os resultados.

Referências

- Akgün, A., Türk, N., 2011. Mapping erosion susceptibility by a multivariate statistical method: A case study from the Ayvalık region, NW Turkey. *Computers & Geosciences* 37, 1515–1524. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.09.006>

- Almeida, F.F.M., Carneiro, C.D.R., 1998. Origem e evolução da Serra do Mar. *Revista Brasileira de Geociências*, v.2, n.28, 135-150.
- Alonso, J.A., Bermúdez, F.L., Rafaelli, S., 2010. La degradación de los suelos por erosión hídrica. Murcia: Universidad de de Murcia, 384 p.
- Beven, K.J., Kirkby, M.J., 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin* 24 (1), 43–69. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Bigarella, J.J., Becker, R.D, Matos, D.J., Werner, A., 1978. A Serra do Mar e a porção oriental do Estado do Paraná: Um problema de segurança ambiental e nacional. Secretaria do Estado do Planejamento do Paraná: Curitiba.
- Bigarella, J.J., 2007. Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais. 2 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, vol. 3.
- Bigarella, J.J., Mousinho, M.R., Silva, J.X., 1965. Pediplanos, pedimentos e seus depósitos correlativos no Brasil. *Boletim Paranaense de Geografia* 16/17, 117-151. DOI: <https://doi.org/10.36403/espacoaberto.2016.7650>
- Bishop, M.P., James, A., Shroder, J.F., Walsh, S.J., 2012. Geospatial technologies and geomorphological mapping: concepts, issues and research directions. *Geomorphology* 137, 5–26. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.06.027>
- Bortolini, W., Silveira, C.T., 2021 Emprego de segmentação multiresolucional no mapeamento digital de formas de relevo. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 22, 899-921. DOI:
- Calvo, A.B., González, A.P., 2015. Geomorphology of the Sierra de Atapuerca and the Middle Arlanzón Valley (Burgos, Spain). *Journal of Maps*, 11:4, 535-544. DOI: <https://doi.org/10.1080/17445647.2014.909339>
- Cavalli, M., Goldin, B., Comiti, F., Brardinoni, F., Marchi, L., 2017. Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models. *Geomorphology* 291, p. 4–16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.009>
- Chen, A., Darbon, J., Morel, J.M., 2014. Landscape evolution models: a review of their fundamental equations. *Geomorphology* 219, 68–86. DOI: [10.1016/j.geomorph.2014.04.037](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.04.037)
- Cheng, W., Zhou, C., Chai, H., Zhao, S., Liu, H., Zhou, Z., 2011. Research and compilation of the Geomorphologic Atlas of the People's Republic of China (1:1,000,000). *Journal of Geographical Sciences*, 21 (1), 89-100. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11442-011-0831-z>
- Couto, E.V., 2015. Evolução denudacional de longo prazo e a relação solo-relevo no noroeste do Paraná. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba.
- Demek, J. (Ed.), 1972. Manual of Detailed Geomorphological Mapping. IGU Commission for Geomorphological Mapping. Academia, Prague.
- Deng, Y., 2007. New trends in digital terrain analysis: landform definition, representation, and classification. *Progress in Physical Geography* 31(4), 405–419. DOI: <https://doi.org/10.1177/0309133307081291>
- Dikau, R., 1989. The Application of a Digital Relief Model to Landform Analysis in Geomorphology. In: Raper, J.F. (ed.). *Three Dimensional Applications in Geographical Information Systems*, London: Taylor & Francis, 51-77.
- Dragut, L., Eisank, C., 2012. Automated object-based classification of topography from SRTM data. *Geomorphology* 141/142, 21–33. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.12.001>
- Ehsani, A. H., Quiel, F., 2009. A semi-automatic method for analysis of landscape elements using Shuttle Radar Topography Mission and Landsat ETM+ data. *Computers & Geosciences* 35, 373–389. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.09.019>
- Ehsani, A.H., Quiel, F., 2008. Geomorphometric feature analysis using morphometric parameterization and artificial neural networks. *Geomorphology* 99, 1–12. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.10.002>
- El-Sheimy, N., Valeo, C., Habib, A., 2005. *Digital Terrain Modelling: Acquisition, Manipulation and Applications*. Artech House, Inc., Norwood-Massachusetts.
- Evans, I. S., 1972. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: Chorley, R. J. (Ed.). *Spatial analysis in geomorphology*. London: Harper & Row, Publishers.
- Fonseca, A.F., Zêzere, J.L., Neves, M., 2014. Geomorphology of the Arrábida Chain (Portugal). *Journal of Maps*, 10:1, p. 103-108.

- DOI:
<https://doi.org/10.1080/17445647.2013.859637>
- Ghosh, A., Bera, B., 2023 Landform classification and geomorphological mapping of the Chota Nagpur Plateau, India. *Quaternary Science Advances* 10, 100082. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2023.100082>
- Haider, V. L., Kropáček, J., Dunkl, I., Wagner, B., Eynatten, H., 2015. Identification of peneplains by multi-parameter assessment of digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40, 1477–1492. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3729>
- Hengl, T., 2006. Finding the right pixel size. *Computers & Geosciences* 32, 1283–1298. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2005.11.008>
- Hengl, T., Reuter, H.I. (eds.), 2009. *Geomorphometry - Concepts, Software, Applications, Series Developments in Soil Science* vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 3-30.
- Horn, B.K.P., 1981. Hill shading and the reflectance map. *Proceedings of the IEEE* 1, n. 69, 14-47. DOI: 10.1109/PROC.1981.11918
- Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B., Zimmermann, M., 2013. Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 13, 869-885. DOI:10.5194/NHESS-13-869-2013
<https://doi.org/10.20502/rbg.v22i4.1987>
- Hutchinson, M.F., 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology* 106, 211-272. DOI: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5)
- 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(3-4): 409-440, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012>
- Jasiewicz, J., Netzel, P., Stepinski, T.F., 2014. Landscapes similarity, retrieval, and machine mapping of physiographic units. *Geomorphology* 221, 104–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.06.011>
- Klimaszewski, M., 1963a. Landform list and signs used in the detailed geomorphological map. *Geographical Studies* 46 (Problems of geomorphological mapping), 139-177.
- Klimaszewski, M., 1963b. The principles of the geomorphological map of Poland. *Geographical Studies* 46 (Problems of geomorphological mapping), 67-72.
- Klimaszewski, M., 1990. Thirty years of detailed geomorphological mapping. *Geographia Polonica* 58, 11-18.
- Leser, H., Stäblein, G. (eds.), 1975. *Geomorphologische Kartierung. Richtlinien zur Herstellung geomorphologischer Karten* 1:25000. *Berliner Geogr. Abh., Sonderheft*: 25 S., Berlin, 1975.
- Li, Z., Zhu, Q., Gold, C. *Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology*. Boca Raton: CRC Press, 2005.
- Luo, W., Pingel, T., Heo, J., Howard, A., Jung, J., 2015. A progressive black top hat transformation algorithm for estimating valley volumes on Mars. *Computers & Geosciences* 75, 17–23. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.11.003>
- Maack, R.R., 1981. *Geografia Física do Estado do Paraná*. 2. ed. Curitiba: Ed. Olympio.
- 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* vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 227-254.
- Matsuura, T., Aniya, M., 2012. Automated segmentation of hillslope profiles across ridges and valleys using a digital elevation model. *Geomorphology* 177 (178), 167–177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.07.024>
- Meyer, N.K., Schwanghart, W., Korup, O., Romstad, B., 2014. Estimating the topographic predictability of debris flows. *Geomorphology* 207, 114–125. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.10.030>
- Milani, E.J., Melo, J.H.G., Souza, P.A., Fernandes, L.A., Franca, A.B., 2007. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro 15, n. 2, 265-287.
- Minár, J., Evans, I.S., 2008. Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. *Geomorphology* 95 (3–4), 236–259. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.06.003>
- Minerpar – Minerais do Paraná S/A., 2001. *Atlas geológico do estado do Paraná*. 116 p.

- Moore, I.D., Burch, G.J., Mackenzie, D.H., 1998. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *Transactions of the ASAE* 31 (4), 1098–1107. DOI: 10.13031/2013.30829
- Moura, N.S.V., 2022. Mapeamento Geomorfológico da Planície e Terras Baixas Costeiras do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. *Espaço Aberto*, v. 12, n.2, 229-246. DOI: 10.36403/espacoaberto.2022.54584
- Olaya, V., 2009. Basic Land-Surface Parameters. In: Hengl, T., Reuter, H.I. (eds.) *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Series Developments in Soil Science* 33, Amsterdam: Elsevier, p. 141-169.
- Othman, A.A., Gloaguen, R., Andreani, L., Rahnema, M., 2018. Improving landslide susceptibility mapping using morphometric features in the Mawat area, Kurdistan Region, NE Iraq: Comparison of different statistical models. *Geomorphology* 319, 147-160. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.07.018>
- Perego, A., Zerboni, A., Cremaschi, M., 2011. Geomorphological Map of the Messak Settafet and Mellet (Central Sahara, SW Libya). *Journal of Maps* 7:1, 464-475.
- Pike, R. J., 2000. Geomorphometry — diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography* 24 (1), 1–20. DOI: <https://doi.org/10.1177/030913330002400101>
- Pike, R.J., 1988. The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. *Mathematical Geology* 20, 491–511. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00890333>
- Pike, R.J., Evans, I., Hengl, T., 2009. *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.
- Pipaud, I., Lehmkuhl, F., 2017. Object-based delineation and classification of alluvial fans by application of mean-shift segmentation and support vector machines. *Geomorphology* 293, 178–200. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.05.013>
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., Planchon, O., 1991. The prediction of hillslope paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. *Hydrological Processes* 5, 59–79. DOI: <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050106>
- Ramos, L.P., Andrade, A.C.S., Nascimento, P.S.R., Santos, J.P.S., 2021. Mapeamento geomorfológico da zona costeira sul de Sergipe, nordeste do Brasil. *Pesquisas em Geociências*, v. 48, n. 3, e107654. DOI: doi.org/10.22456/1807-9806.107654
- Riffel, S.B., 2012. 40Ar/39Ar and (U-Th)/He Dating of Weathered Landsurfaces on the Rifted Continental Margin of Southern Brazil. Tese de Doutorado. The University of Queensland, Brisbane.
- Riffel, S.B., Vasconcelos, P.M., Carmo, I.O., Farley, K.A., 2015. Combined 40Ar/39Ar and (U-Th)/He geochronological constraints on long-term landscape evolution of the Second Paraná Plateau and its ruiniform surface features, Paraná, Brazil. *Geomorphology* 233, 52–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.10.041>
- Riffel, S.B., Vasconcelos, P.M., Carmo, I.O., Farley, K.A., 2016. Goethite (U-Th)/He geochronology and precipitation mechanisms during weathering of basalts. *Chemical Geology*, n. 446, p.18–32, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.03.033>
- Riquelme, R., Darrozes, J., Maire, E., Hérail, G., Soula, J.C., 2008. Long-term denudation rates from the Central Andes (Chile) estimated from a Digital Elevation Model using the Black Top Hat function and Inverse Distance Weighting: implications for the Neogene climate of the Atacama Desert. *Revista Geológica de Chile*, 35 (1), 105-121. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-02082008000100005>
- Rodrigues, S.C., Augustin, C.H.R.R., Nazar, T.I.S.M., 2023. Mapeamento Geomorfológico do Estado de Minas Gerais: uma proposta com base na morfologia. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.24, n.1, e2233. DOI: <http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v24i1.2233>
- Rodriguez, F., Maire, E., Courjault-Rad'e, P., Darrozes, J., 2002. The Black Top Hat function applied to a DEM: a tool to estimate recent incision in a mountainous watershed. (Estibère Watershed, Central Pyrenees). *Geophysical Research Letters* 29(6), 9-1. DOI: <https://doi.org/10.1029/2001GL014412>
- 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* 2, 3-12. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v7i2.74>
- Saritha, G., Saravanan, T., Anbumani, K., Surendiran, J., 2021. Digital elevation model and terrain mapping using LiDAR. *Materials Today: Proceedings* 46, 3979–3983. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.525>
- Silva, T.M., 2021. Raízes dos mapeamentos geomorfológicos e perspectivas atuais. *Humboldt - Revista de Geografia Física e Meio Ambiente* v. 1, n. 2, e57380.
- 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., 2013. Emprego de atributos topográficos no mapeamento da susceptibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacaré/Paraná. *Sociedade & Natureza* 24, 623-639. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1982-45132013000300014>
- Silveira, C.T., Fiori, A.P., Schilipack, P., Dias, S.M., 2014. Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da Serra do Mar Paranaense apoiado na análise digital do relevo. *Revista Brasileira de Geomorfologia* 15, 3-22. DOI: <https://doi.org/10.20502/rbg.v15i1.366>
- Silveira, R.M.P., Silveira, C.T., 2021. Análise temática e conceitual de mapas geomorfológicos: a transcrição gráfica da complexidade do relevo. *Revista Brasileira de Cartografia* 73, 574-597. DOI: <https://doi.org/10.14393/rbcv73n2-54437>
- Smith, B., Mark, D.M., 2003. Do mountains exist? Towards an ontology of landforms. *Environment and Planning B: Planning and Design* 30 (3), 411–427. DOI: <https://doi.org/10.1068/b12821>
- Soares, P.C., Riffel, S.B., 2006. Hypsometric Curves as a Tool for Paleosurface Mapping. *Mathematical Geology* 38, 679-695.
- Tarboton, D.G., 1997. A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models. *Water Resources Research*, 33(2), 309-319. DOI: <https://doi.org/10.1029/96WR03137>
- Tricart, J., 1965. *Principes et méthodes de la géomorphologie*. Paris: Masson Ed., 201p.
- Valdati, J., Ferreira, D.R., Gomes, M.G.V., 2021. Determinação do perigo de inundação a partir do mapeamento geomorfológico de detalhe. *Geosul*, v. 36, n. 78, 496-515. DOI: <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2021.e67385>
- Viloria, J. A., Viloria-Botello, A., Pineda, M.C., Valera, A., 2016. Digital modelling of landscape and soil in a mountainous region: a neuro-fuzzy approach. *Geomorphology* 253, 199–207. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.10.007>
- Waichel, B.L., Lima, E.F., Lubachesky, R., Sommer, C.A., 2006. Pahoehoe flows from the central Paraná Continental Flood Basalts. *Bulletin of Volcanology* (Print), Heidelberg 68 (7:8), 599-610. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00445-005-0034-5>
- Weiss, A., 2001. Topographic Position and Landforms Analysis. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego.
- Wilson, J.P., 2012. Digital terrain modelling. *Geomorphology* 137, 107–121. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.03.012>
- Wilson, J.P., Gallant, J.C. (eds.), 2000. *Terrain analysis: principles and applications*. New York: John Wiley & Sons.
- Zevenbergen, L.W., Thorne, C.R., 1987. Quantitative Analysis of Land Surface Topography. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 12, 47-56. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3290120107>