

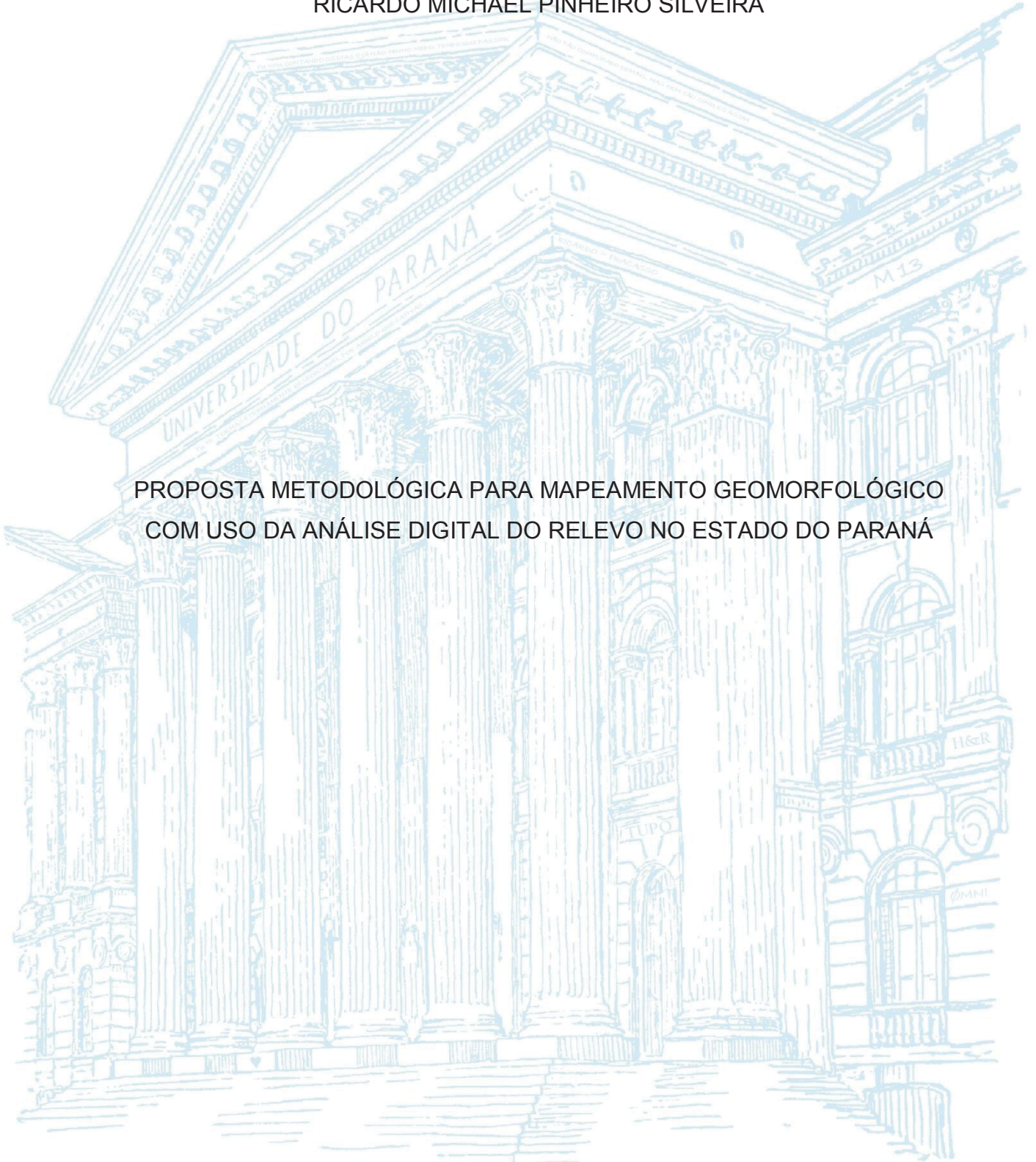
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

RICARDO MICHAEL PINHEIRO SILVEIRA

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO
COM USO DA ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO NO ESTADO DO PARANÁ

CURITIBA

2019



RICARDO MICHAEL PINHEIRO SILVEIRA

PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO
COM USO DA ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO NO ESTADO DO PARANÁ

Tese apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Doutor em Geografia, no Curso de Pós-Graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Claudinei Taborda da Silveira

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

S587p

Silveira, Ricardo Michael Pinheiro

Proposta metodológica para mapeamento geomorfológico com uso da análise digital do relevo no estado do Paraná [recurso eletrônico] / Ricardo Michael Pinheiro Silveira. – Curitiba, 2019.

Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências da Terra, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2019.

Orientador: Claudinei Taborda da Silveira .

1. Geomorfologia – Mapas - Paraná. 2. Cartografia. 3. Relevo (Geografia) – Paraná. I. Universidade Federal do Paraná. II. Silveira, Claudinei Taborda da. III. Título.

CDD: 551.4108162

Bibliotecário: Elias Barbosa da Silva CRB-9/1894

TERMO DE APROVAÇÃO


Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em GEOGRAFIA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Tese de Doutorado de **RICARDO MICHAEL PINHEIRO SILVEIRA**, intitulada: **PROPOSTA METODOLÓGICA PARA MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO COM USO DA ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO NO ESTADO DO PARANÁ**., após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de Doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 19 de Fevereiro de 2019.



CLAUDINEI TABORDA DA SILVEIRA
Presidente da Banca Examinadora



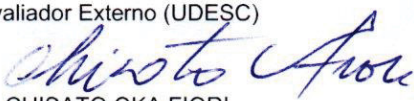
LEONARDO JOSÉ CORDEIRO SANTOS
Avaliador Interno (UFPR)



ROMÁRIO TRENTIN
Avaliador Externo (UFSM)



JAIRO VALDATI
Avaliador Externo (UDESC)



CHISATO OKA FIORI
Avaliador Externo (UFPR)



FABIANO ANTONIO DE OLIVEIRA
Avaliador Interno (UFPR)

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Paraná pelo ensino público, gratuito e de excelência.

Ao Prof. Dr. Claudinei Taborda da Silveira, orientador que a vida presenteou como amigo, pela confiança e apoio irrestrito no trabalho desenvolvido desde a graduação, pela seriedade e dedicação profissional, referência intelectual e incentivo constante.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudos; ao CNPq, pelo financiamento do projeto de pesquisa “Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná”; e às políticas públicas de educação e inclusão social que possibilitaram minha formação acadêmica e a consequente entrega desta tese à sociedade brasileira.

Ao Laboratório de Pesquisas Aplicadas em Gemorfologia e Geotecnologias (LAGEO/UFPR) — ecúmeno acadêmico que vi nascer e chamo de lar — e a todos os participantes envolvidos, atuais e pretéritos, pelo auxílio, aprendizado, convivência e experiências compartilhadas.

Às companhias morfoestruturais que auxiliaram na modelagem desta etapa da vida: Bruna Rutyna, Camila Jakimiu, Clotilde Zai, Cynthia Roberti, Everton Bortolini, Flavio Lima, Gabriela Queluz, Giovani Fronza, Heckley Vaz, José Oliveira, Josemar Silva (Mercenários B. C.), Juliana Senna, Julio Manoel (30’), Marcelo Hung, Priscila D’Aroz, Maurielle Felix, Reginaldo Correia, Soraia Gomes e Aline Martinhago; às queridas doutorandas lageanas: Gisele Neuman e Taísa Comerlato; e aos diplomatas de labuta, campo, celeuma e peleja: Victor Pierobom e Willian Bortolini.

Aos tunantes benquistos Alexei Nowatzki (outrora marginal alado nas peripécias do doutoramento), Rafael Bittencourt, Diego Frantz e Nataniel Bassi (Mike e Montana), pelas trilhas forasteiras, com contratemplos e contra baixos, risadas e tempestades, provendo trabalhos de campo informais — no inverno, conforme a tradição.

À Dieiny Crestani, sustentáculo além-mar que nunca esteve distante, pelo alento e acompanhamento em todas as etapas desse processo com muito desvelo, encorajamento e confiança. Há, aqui, muito de ti. Com amor, спасибо!

À minha família, em especial à minha tríade materna (Adaleta, Aurenice e Alzira) e à respectiva tríade subderivada (Caio, Klaus e Clara), por tudo que couber no vocábulo *tudo*. Eis o resultado da dedicação, incentivo, coragem e luta de vocês — a quem, com muito amor, dedico cada palavra.

Ao Julio Pregolini, totem sagrado convertido em irmão pelas fortuitas venturas do acaso, por todas as reflexões, conciliábulos e alentos — anarquero é o que sois. E, também, à família Bassi-Pregolini (Roseli, Oswaldo, Renato e Vanessa), pelo acolhimento, amizade e por manter a "História Viva".

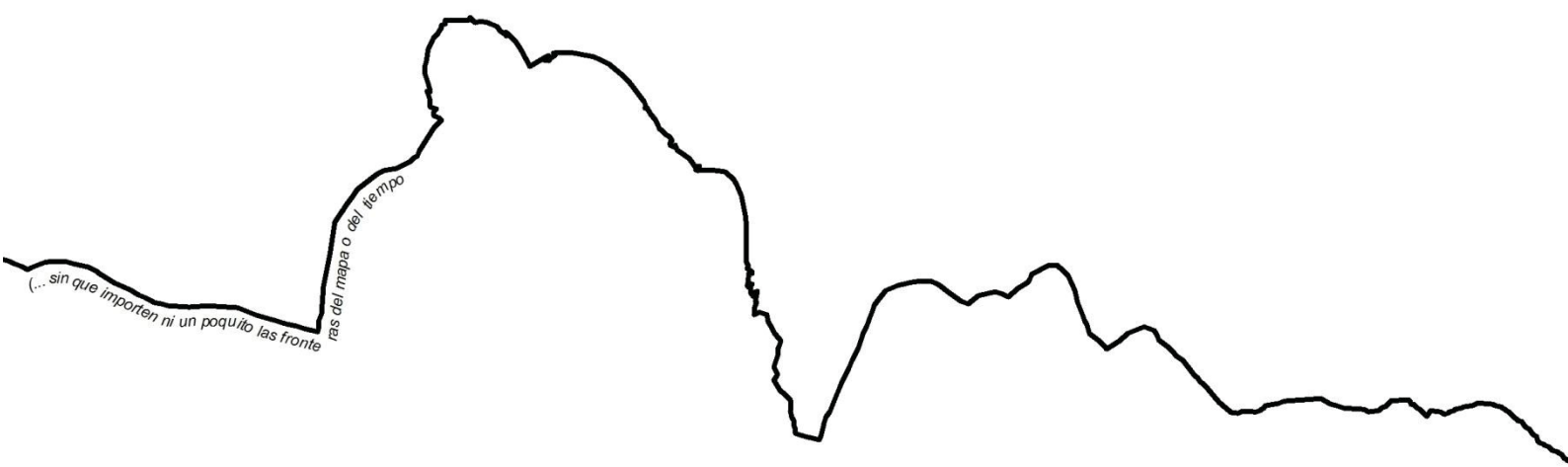
Aos amigos Vinicius Silva, Naiane Cotting e Vivaldo Manuélis, pelo ânimo renovado a cada encontro, cada conversa e cada riso na companhia de *vosotros*.

À Marcia Alves, pela amizade repleta de coincidências advindas desde o nascimento, quase simultâneo, até a conclusão do doutorado, quase simultânea — com um livro e muitas histórias, no meio do caminho.

A todos os professores que, em todos os níveis de ensino, passaram pela minha vida, e àqueles que auxiliaram de modo mais efetivo na presente tese: Ângelo Evaristo Sirtoli, Chisato Oka-Fiori, Fabiano Antônio de Oliveira, Jairo Valdati, Leonardo José Cordeiro Santos e Romário Trentin.

Ao Programa de Pós Graduação em Geografia (PPGGEO/UFPR), em sua totalidade: docentes, funcionários (Adriana, Alexandra e Luiz Zem) e colegas discentes.

À força, à coragem e à sabedoria: virtudes intrínsecas ao êxito.



(... sin que importen ni un poquito las fronte

ras del mapa o del tiempo

*“La primera condición para cambiar
la realidad consiste en conocerla”*

(Eduardo Galeano)

RESUMO

Mapas geomorfológicos constituem complexos documentos temáticos multiescalares (têmporo-espaciais), que devem representar, conjuntamente, as dimensões (morfometria), o aspecto (morfografia), a origem (morfogênese), os processos atuantes (morfodinâmica) e a idade (morfocronologia) do relevo. Recentemente, com o desenvolvimento da análise digital do relevo, muitas técnicas geomorfométricas em ambiente informatizado têm favorecido a extração de parâmetros (atributos geomorfométricos) e objetos (feições ou processos) geomorfológicos com o uso de Modelos Digitais do Terreno (MDTs). Nesse contexto, a presente tese propõe uma metodologia para mapeamento geomorfológico semiautomatizado, integrando elementos morfométricos, morfográficos, morfogenéticos, morfodinâmicos e morfocronológicos, utilizando somente variáveis quantitativas mensuradas a partir de uma base planialtimétrica, com a obtenção de um MDT e dos atributos geomorfométricos derivados. As regras classificatórias orientadas a objeto foram aplicadas no estado do Paraná, Brasil. A elaboração da proposta metodológica contemplou cinco etapas principais: i) aquisição, análise e interpretação de 57 mapas geomorfológicos de distintas escalas, datas e países, sob a perspectiva temática e geomorfológica; ii) aquisição e correção da base de dados para a interpolação do MDT (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); iii) criação das regras de classificação parametrizada, para cada objeto de cada aspecto geomorfológico; iv) etapas de controle de campo, validação e interpretação dos resultados obtidos; v) 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 fluviomarinha), terraços e cones de dejeção; ii) Morfogênese: fluviomarinha, 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. Na etapa de análise temática dos distintos mapas geomorfológicos publicados a nível mundial, concluiu-se que há uma diversidade de propostas, com variações conceituais e/ou de simbolização, dificuldade de padronização da legenda e ênfase morfográfica e morfogenética. Referente aos resultados da modelagem, os trabalhos de campo, com observações *in loco* distribuídas em toda a área de estudo, e as publicações prévias, com descrições ou datações geocronológicas, confirmaram a hipótese 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. A criação de regras de classificação unificadas para uma área extensa e com contextos geomorfológicos muito distintos, como o estado do Paraná, demonstrou que a metodologia pode ser replicada para outras localidades. A qualidade do MDT e o rigor metodológico durante a etapa de classificação orientada a objeto foram os fatores preponderantes para a eficácia da proposta, na qual o componente escalar deve ser compatibilizado com os objetivos do mapeamento.

Palavras-chave: Geomorfometria; Cartografia Geomorfológica; Modelo Digital do Terreno; Atributos geomorfométricos; Relevo do Paraná.

ABSTRACT

Geomorphological maps are complex multiscalar (temporo-spatial) documents, which should represent, together, the dimensions (morphometry), the aspect (morphography), the origin (morphogenesis), the active processes (morphodynamics) and the age (morphology) of the landforms. Recently, with the development of digital terrain analysis, many geomorphometric techniques in a computerized environment have favored the extraction of parameters (geomorphometric attributes) and objects (features or processes) with the use of Digital Terrain Models (DTMs). In this context, the present thesis proposes a methodology for semiautomated geomorphological mapping, integrating morphometric, morphographic, morphogenetic, morphodynamic and morphochronological elements, using only quantitative variables measured from a planialtimetric basis, obtaining MDT and derived geomorphometric attributes. 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, analysis and interpretation of 57 geomorphological maps of different scales, dates and countries, under the thematic and geomorphological perspective; ii) acquisition and correction of the database for the interpolation of the MDT (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); iii) creation of the parametrized classification rules, for each object of each geomorphological aspect; iv) stages of field control, validation and interpretation of results; v) composition of the legend. The following objects were modeled: i) Morphography: valleys (closed, open and flat), tops (sharp and convex), ridges, flood plain (fluvial and fluvio-marine), terraces and alluvial fans; ii) Morphogenesis: fluvio-marine, fluvial and denudacional; 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. In the thematic analysis stage of the different geomorphological maps published worldwide, it was concluded that there is a diversity of proposals, with conceptual variations and/or symbolization, difficulty of standardization of the legend and morphographic and morphogenetic emphasis. Regarding the results of the modeling, the fieldwork, with observations in situ distributed throughout the study area, and the previous publications, with descriptions or geochronological dates, confirmed the hypothesis of the creation of a geomorphological map, with all its essential aspects, using only procedures related to digital terrain analysis - increasing its potential as the main methodological tool for geomorphological cartography. The creation of unified classification rules for a wide area and with very distinct geomorphological contexts, such as the state of Paraná, has demonstrated that the methodology can be replicated to other locations. The quality of the DTM and the methodological rigor during the object-oriented classification stage were the preponderant factors for the effectiveness of the proposal, in which the scalar component must be compatible with the mapping objectives.

Key-words: Geomorphometry; Geomorphological cartography; Digital Terrain Model; Geomorphometric attributes; Paraná landforms.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - PRINCIPAIS UNIDADES MORFOESCULTURAIS E BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ESTADO DO PARANÁ.....	15
FIGURA 2 - MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DO PARANÁ.....	16
FIGURA 3 – VARIÁVEIS VISUAIS DE BERTIN (1967) COM APLICAÇÃO PONTUAL	47
FIGURA 4 - FLUXOGRAMA METODOLÓGICO	53
FIGURA 5 - ABRANGÊNCIA DOS MAPAS GEOMORFOLÓGICOS ANALISADOS	55
FIGURA 6 - VARIÁVEIS VISUAIS E SEUS MODOS DE IMPLANTAÇÃO	55
FIGURA 7 - JANELA MÓVEL 3x3 PARA CÁLCULO DE ATRIBUTOS GEOMORFOMÉTRICOS LOCAIS	58
FIGURA 8 - MÉTODO D-INFINITO PARA DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO	61
FIGURA 9 - ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA.....	62
FIGURA 10 - FUNÇÃO <i>TOP HAT</i> APLICADA À ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO ..	63
FIGURA 11 - CLASSIFICAÇÃO TAXONÔMICA DOS FATOS GEOMORFOLÓGICO DE TRICART	64
FIGURA 12 - HIERARQUIA TAXONÔMICA DE DIKAU	65
FIGURA 13 - MODELAGEM DAS PALEOSUPERFÍCIES E INDICADORES MORFOCRONOLÓGICOS	72
FIGURA 14 - EXEMPLO DE PARAMETRIZAÇÃO DE CONES DE DEJEÇÃO	75
FIGURA 15 - CAMPANHAS DE CAMPO	79
FIGURA 16 - ÊNFASE DOS MAPEAMENTOS ANALISADOS	89
FIGURA 17 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFOMETRIA	92
FIGURA 18 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFOGRAFIA.....	94
FIGURA 19 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFOGÊNESE	97
FIGURA 20 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFODINÂMICA.....	99
FIGURA 21 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFOCRONOLOGIA.....	102
FIGURA 22 - ANÁLISE DE INFORMAÇÕES ADICIONAIS APRESENTADAS NOS MAPAS	103
FIGURA 23 - EXEMPLO DOS RESULTADOS DA MODELAGEM.....	106
FIGURA 24 - MAPEAMENTO EM PONTAL DO PARANÁ.....	109
FIGURA 25 - PLANÍCIE FLUVIOMARINHA E SOPÉS DA SERRA DO MAR	111
FIGURA 26 - MAPEAMENTO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JACAREÍ	113
FIGURA 27 - TRANSIÇÃO ENTRE PLANÍCIE LITORÂNEA E SERRA DO MAR ..	114

FIGURA 28 - MAPEAMENTO NA SERRA DO IBITIRAQUIRE	119
FIGURA 29 - EROSÃO POTENCIAL NA SERRA DO IBITIRAQUIRE	121
FIGURA 30 - PERFIL DE PALEOSUPERFÍCIES NA SERRA DO MAR	122
FIGURA 31 - PALEOSUPERFÍCIES E MORFOGÊNESE DA SERRA DO MARUMBI	125
FIGURA 32 - MODELAGEM DE PALEOSUPERFÍCIES NA SERRA DO IBITIRAQUIRE	126
FIGURA 33 - SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS UTILIZADAS POR SALGADO <i>et al.</i> (2014) PARA A MENSURAÇÃO DA TAXA DE DENUDAÇÃO.....	127
FIGURA 34 - MODELAGEM NA SERRA DA BAITACA E SERRA DO MARUMBI	129
FIGURA 35 - MAPEAMENTO ENTRE A SERRA DO MAR E NORTE DO PRIMEIRO PLANALTO	131
FIGURA 36 - MAPEAMENTO NA REGIÃO DO VALE DO RIO RIBEIRA.....	132
FIGURA 37 - MAPEAMENTO NO PLANALTO DE CURITIBA.....	133
FIGURA 38 - MAPEAMENTO EM ÁREA DE RELEVO CÁRSTICO (COLOMBO) .	137
FIGURA 39 - MAPEAMENTO NA REGIÃO DE CASTRO.....	139
FIGURA 40 - PERFIL DE PALEOSUPERFÍCIES NO PRIMEIRO PLANALTO	141
FIGURA 41 - MODELAGEM DE PALEOSUPERFÍCIES E PONTOS DE DATAÇÃO GEOCRONOLÓGICA NO PRIMEIRO PLANALTO	143
FIGURA 42 - MAPEAMENTO NA ESCARPA DE SÃO LUIZ DO PURUNÃ	147
FIGURA 43 - MAPEAMENTO NA ESCARPA DE JAGUARIAÍVA (VALE DO CODÓ)	148
FIGURA 44 - MAPEAMENTO NA REGIÃO DE PONTA GROSSA	151
FIGURA 45 - MAPEAMENTO NA REGIÃO DE CÂNDIDO DE ABREU	153
FIGURA 46 - MAPEAMENTO NO SALTO SÃO JOÃO EM PRUDENTÓPOLIS.	155
FIGURA 47 - MAPEAMENTO NA SERRA DA ESPERANÇA	157
FIGURA 48 - PERFIL DE PALEOSUPERFÍCIES NO SEGUNDO PLANALTO	158
FIGURA 49 - MODELAGEM DE PALEOSUPERFÍCIES E PONTOS DE DATAÇÃO GEOCRONOLÓGICA NO SEGUNDO PLANALTO.....	159
FIGURA 50 - MAPEAMENTO NA REGIÃO DE RONCADOR.....	163
FIGURA 51 - MAPEAMENTO E EROSÃO POTENCIAL NA REGIÃO DE IRETAMA	164
FIGURA 52 - MAPEAMENTO NO RIO IVAÍ, REGIÃO DE BORRAZÓPOLIS	166
FIGURA 53 - MAPEAMENTO NA REGIÃO DE MATO RICO.....	167
FIGURA 54 - MAPEAMENTO NA REGIÃO SUDOESTE DO PARANÁ	169
FIGURA 55 - MAPEAMENTO NO RIO IVAÍ, REGIÃO NOROESTE DO PARANÁ.	171

FIGURA 56 - MAPEAMENTO NOS TRÊS MORRINHOS (TERRA RICA)	173
FIGURA 57 - MAPEAMENTO E EROÇÃO POTENCIAL EM LOANDA, REGIÃO NOROESTE.....	175
FIGURA 58 - PERFIL DE PALEOSUPERFÍCIES NO TERCEIRO PLANALTO.....	177
FIGURA 59 - SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS UTILIZADAS POR COUTO (2015) PARA A MENSURAÇÃO DA TAXA DE DENUDAÇÃO	180
FIGURA 60 - MODELAGEM DE PALEOSUPERFÍCIES E PONTOS DE DATAÇÃO GEOCRONOLÓGICA NO TERCEIRO PLANALTO	182

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CATEGORIAS E ESCALAS DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS	41
TABELA 2 - ATRIBUTOS GEOMORFOMÉTRICOS CALCULADOS	58
TABELA 3 - PARÂMETROS GEOMORFOMÉTRICOS PARA A MODELAGEM DA MORFOGÊNESE.....	68
TABELA 4 - PARÂMETROS PARA A ELABORAÇÃO DOS MODELOS DE PALEOSUPERFÍCIES	71
TABELA 5 - PARÂMETROS GEOMORFOMÉTRICOS PARA A MODELAGEM DA MORFOGRAFIA	74
TABELA 6 - PARÂMETROS DO ÍNDICE DE EROSIVIDADE CLIMÁTICA	78
TABELA 7 - ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA E TEMÁTICA DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS (PARTE 1)	83
TABELA 8 - ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA E TEMÁTICA DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS (PARTE 2)	84
TABELA 9 - ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA E TEMÁTICA DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS (PARTE 3)	85
TABELA 10 - ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA E TEMÁTICA DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS (PARTE 4)	86
TABELA 11 - ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA E TEMÁTICA DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS (PARTE 5)	87
TABELA 12 - ÊNFASE DOS MAPEAMENTOS ANALISADOS	90
TABELA 13- ÊNFASE DOS MAPEAMENTOS ANALISADOS POR OCORRÊNCIA EM CADA ASPECTO GEOMORFOLÓGICO	90
TABELA 14 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFOMETRIA	93
TABELA 15 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFOGRAFIA	95
TABELA 16 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFOGÊNESE.....	97
TABELA 17 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFODINÂMICA	100
TABELA 18 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFOCRONOLOGIA.....	103
TABELA 19 - RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DE TAXAS DE DENUDAÇÃO NA SERRA DO MAR	127
TABELA 20 - QUANTIFICAÇÃO DOS OBJETOS MAPEADOS PARA CADA GRUPO GEOLÓGICO DO SEGUNDO PLANALTO PARANAENSE	145
TABELA 21 - ESTIMATIVAS DE TAXAS DE DENUDAÇÃO NO TERCEIRO PLANALTO.....	180

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AC - Área de Contribuição

AML - Acurácia Máxima Local

APA - Área de Preservação Ambiental

BTH - *Black Top Hat*

CNPq - Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico

DML - Delineação Mínima Legível

DSG - Diretoria de Serviço Geográfico do Exército

GPS - Sistema de Posicionamento Global

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICR - Índice de Concentração de Rugosidade

IPE - Índice de Potência do Escoamento

IPT - Índice de Posição Topográfica

ITU - Índice Topográfica de Umidade

Ma - Milhões de anos

MDE - Modelo Digital de Elevação

MDS - Modelo Digital de Superfície

MDT - Modelo Digital do Terreno

MNT - Modelo Numérico do Terreno

PEC - Padrão de Exatidão Cartográfico

Ps - Paleosuperfície

SAGA - *System for Automated Geoscientific Analyses*

SIG - Sistemas de Informações Geográficas

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

T - Terraço

UGI - União Internacional de Geografia

WTH - *White Top Hat*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	JUSTIFICATIVA E HIPÓTESE	16
1.2	OBJETIVOS	18
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	GEOMORFOMETRIA.....	19
2.1.1	Modelos digitais do terreno e atributos geomorfométricos	21
2.1.2	Classificações e aplicações geomorfométricas.....	27
2.2	CARTOGRAFIA GEOMORFOLÓGICA	36
2.2.1	Mapeamento geomorfológico no âmbito da cartografia temática	43
2.2.2	Mapeamento geomorfológico em ambiente digital.....	48
3	MATERIAIS E MÉTODOS	53
3.1	ANÁLISE DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS	54
3.2	PROCESSAMENTO DO MODELO DIGITAL DO TERRENO	56
3.3	CÁLCULO DOS ATRIBUTOS GEOMORFOMÉTRICOS	58
3.4	PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO GEOMORFOMÉTRICA	66
3.4.1	Morfogênese	67
3.4.2	Morfocronologia.....	69
3.4.3	Morfografia	73
3.4.4	Morfometria	76
3.4.5	Morfodinâmica	76
3.5	ETAPAS DE CONFERÊNCIA EM CAMPO	79
3.6	SISTEMA DE LEGENDA.....	80
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
4.1	ANÁLISE DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS	82
4.2	MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO	105
4.2.1	Planície Litorânea.....	107
4.2.2	Serra do Mar	115
4.2.3	Primeiro Planalto	129
4.2.4	Segundo Planalto	144
4.2.5	Terceiro Planalto	159
4.3	LIMITAÇÕES E POTENCIALIDADES DA MODELAGEM	182
5	CONCLUSÕES	190
6	REFERÊNCIAS	193
	APÊNDICES	216

1 INTRODUÇÃO

Mapas geomorfológicos constituem documentos cartográficos que objetivam a representação integrada do relevo sob suas diversas variáveis e dimensões constituintes. Conforme apontam Klimaszewski (1982), Kohler (2001), Florenzano (2008), Dramis *et al.* (2011) e Coltrinari (2011), o mapa geomorfológico é um complexo produto temático devido ao elevado número de informações a serem cartografadas (morfometria, morfografia, morfogênese, morfodinâmica e morfocronologia), às subjetividades intrínsecas à interpretação dos fatos geomorfológicos e também devido às concepções têmporo-espaciais multiescalares associadas à representação do relevo.

No cenário atual, o aparato técnico proveniente do desenvolvimento das geotecnologias impulsionou o desenvolvimento científico da geomorfometria, entendida como a ciência da análise quantitativa da superfície terrestre (PIKE, 2000). Essa, por sua vez, configura-se como ferramenta essencial para a cartografia geomorfológica (HENGL; REUTER, 2009; SEIJMONSBERGEN *et al.*, 2011; BISHOP *et al.*, 2012), tanto pela disponibilidade de dados quanto pela capacidade de processamento em ambiente informatizado (OTTO; SMITH, 2003).

Conforme Evans *et al.* (2009), a geomorfometria moderna auxilia, de modo concomitante, na descrição, mapeamento e interpretação das formas de relevo, com destaque para: a) interpretação visual de modelos digitais do terreno (MDTs); b) reconhecimento automatizado e quantificação de propriedades geomorfológicas; c) extração automatizada de estruturas hidrológicas ou denudacionais; d) extração automatizada de formas de relevo, sendo essa uma das áreas de pesquisa mais ativas no campo da geomorfologia recente.

Nesse contexto, a tese apresenta uma proposta metodológica para mapeamento geomorfológico amparada exclusivamente por técnicas geomorfométricas, derivando um conjunto de regras classificatórias semiautomatizadas para a representação dos aspectos elementares do relevo (morfometria, morfografia, morfogênese, morfocronologia e morfodinâmica). 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 (que possui área de 199315 km²).

Referente às características geomorfológicas regionais da área de estudo, destaca-se o trabalho pioneiro de Maack (1981), que na década de 1940 propôs a primeira regionalização geomorfológica do Paraná (Litoral, Serra do Mar, Primeiro, Segundo e Terceiro Planalto) e, mais recentemente, o mapa geomorfológico do estado do Paraná, publicado por Santos *et al.* (2006) e Oka-Fiori *et al.* (2006), que foi o primeiro trabalho de cartografia sistemática do relevo realizado para todo o estado.

O mencionado mapeamento (*op. cit.*) foi realizado na escala 1:250.000, com ênfase na morfoestrutura e morfoescultura. Dos seis níveis taxonômicos da proposta hierárquica de Ross (1992), devido à escala adotada para o trabalho apenas os três primeiros foram contemplados pelo mapeamento. No 1º taxon, foram identificadas três unidades morfoestruturais, associadas às macroestruturas geológicas; no 2º taxon, representado pela FIGURA 1, constam cinco unidades morfoesculturais, equivalentes à regionalização de Maack (1981); no 3º taxon foram mapeadas cinquenta subunidades morfoesculturais, delimitadas a partir do agrupamento de formas do relevo que caracterizam áreas geomorfológicas homogêneas.

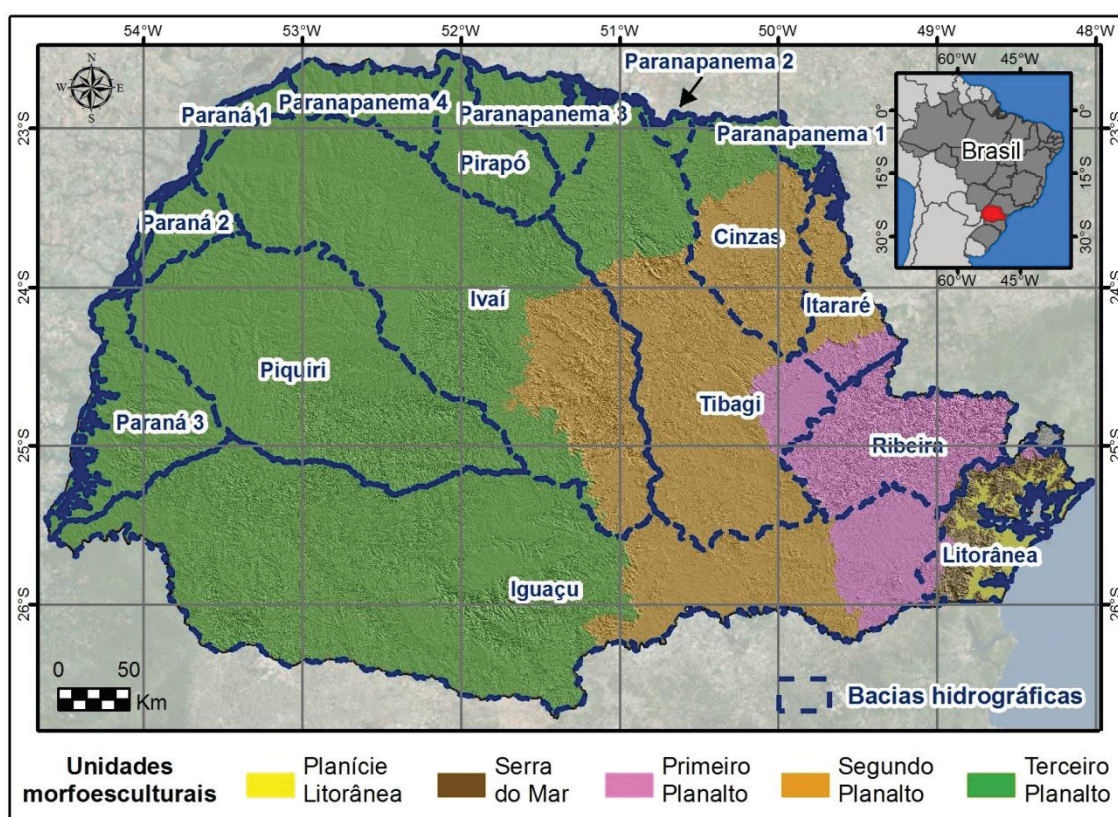
Nos últimos anos, muitas publicações vinculadas ao Laboratório de Pesquisas Aplicadas em Geomorfologia e Geotecnologias (LAGEO / UFPR) têm permitido o avanço e o detalhamento, com aplicações específicas, do mapeamento do relevo paranaense — tendo como base metodológica, sobretudo, a análise digital do relevo. Dentre os principais trabalhos, destacam-se testes de classificações para todo o Paraná, como em Silveira e Silveira (2015, 2016 e 2017) e Silveira *et al.* (2014 e 2018), e também testes em áreas específicas, como Bortolini *et al.* (2017) na região sudoeste paranaense, Silveira *et al.* (2012), Neuman (2017) e Bortolini *et al.* (2018), na porção leste e Gomes *et al.* (2018) na transição entre o Primeiro e o Segundo Planalto. As mencionadas publicações, assim como a presente tese, se inserem num projeto maior, intitulado “Mapeamento geomorfológico do estado do Paraná apoiado em análise digital do relevo”, vinculado ao CNPq.

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 (entre o período Arqueano e Paleozoico), constituintes do embasamento da Plataforma Sul-Americana e parcialmente recobertas por sedimentos recentes de origem marinha e continental; b) a Bacia do Paraná, com rochas sedimentares e

vulcânicas que recobriram o Escudo 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).

As principais unidades litoestratigráficas, detalhadas, são apresentadas pelo mapa geológico do estado do Paraná (FIGURA 2) e discutidas ao longo da tese, conjuntamente aos resultados da proposta aplicada.

FIGURA 1 - PRINCIPAIS UNIDADES MORFOESCULTURAIS E BACIAS HIDROGRÁFICAS DO ESTADO DO PARANÁ

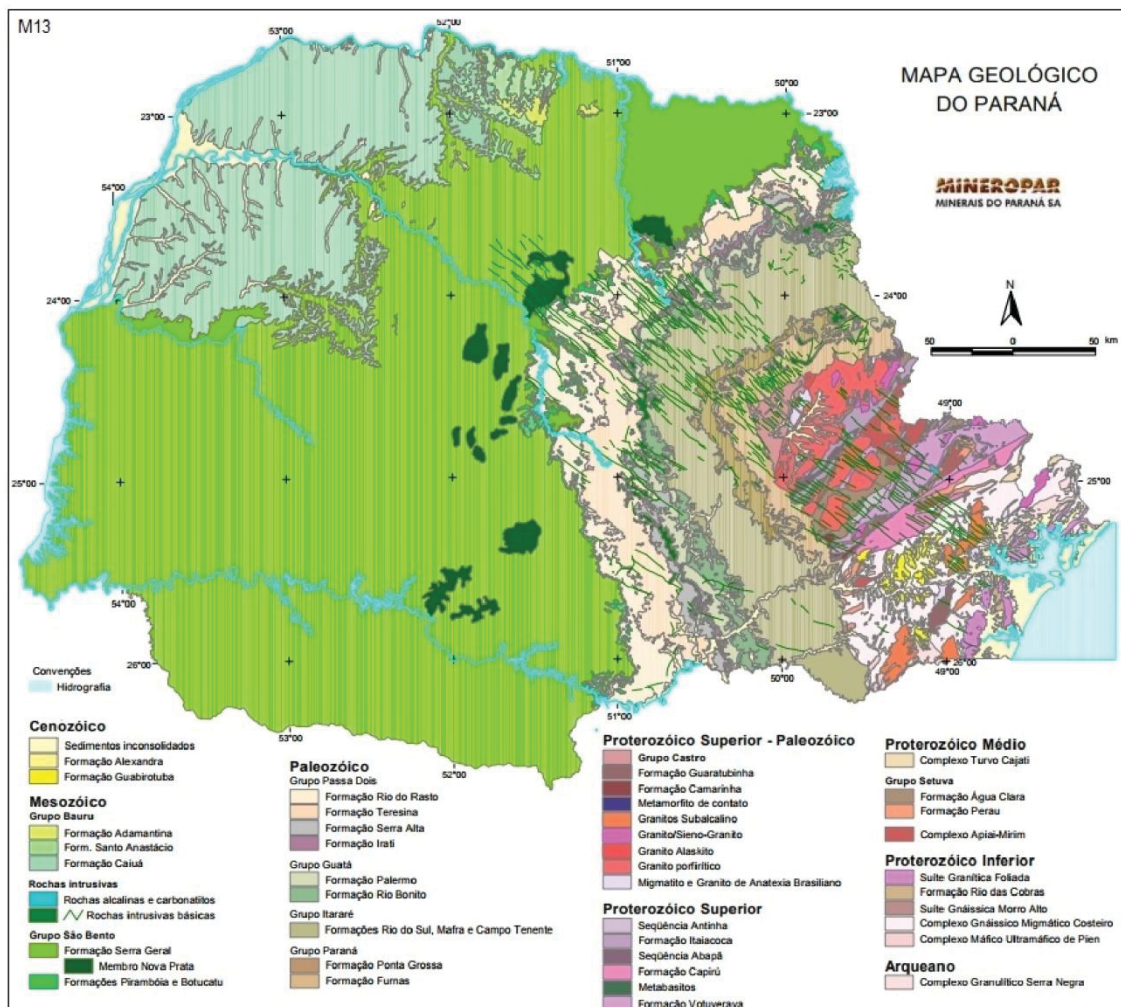


FONTE: o autor (2019)

O Escudo Paranaense está exposto na região leste (Primeiro Planalto, Serra do Mar e Litoral), enquanto a Bacia do Paraná ocupa a porção oeste do estado do Paraná. A área da bacia com as 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 (derrames basálticos originados pela ruptura de Gondwana), formando o Terceiro Planalto, recobertas por sedimentos cretáceos depositados em ambiente desértico no noroeste do estado.

Sedimentos recentes ocorrem em todas as regiões, sobretudo nos vales dos rios, além dos depósitos inconsolidados na Planície Litorânea (MINEROPAR, 2001).

FIGURA 2 - MAPA GEOLÓGICO DO ESTADO DO PARANÁ



FONTE: Mineropar (2001)

1.1 JUSTIFICATIVA E HIPÓTESE

Recentemente, muitos trabalhos de mapeamento do relevo se atêm à identificação e extração automatizada ou semiautomatizada de objetos geomorfológicos a partir da análise digital do relevo. Embora haja o predomínio de aplicações voltadas à morfologia (formas de relevo), o mapeamento de objetos relacionados a outros aspectos geomorfológicos (principalmente processos) também vem sendo explorado, direta ou indiretamente, com o auxílio da geomorfometria.

Entretanto, apesar das diversas propostas metodológicas para identificação de objetos geomorfológicos específicos, há uma lacuna em trabalhos que buscam

sistematizar parâmetros geomorfométricos numa perspectiva integradora para a representação e interpretação do relevo considerando 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, mas não como base metodológica e operacional.

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.

A tese apresentada se apoia na premissa 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 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 relevo possibilita vincular dados morfométricos à interpretação do aspecto, origem, dinâmica e idade do relevo, tendo relação, ainda, com as características litológicas.

Assim, tem-se como hipótese principal que é possível produzir um mapa geomorfológico, integrando elementos morfométricos, morfográficos, morfogenéticos, morfodinâmicos e morfocronológicos, utilizando somente parâmetros quantitativos mensurados a partir de uma base planialtimétrica com pontos cotados, curvas de nível e hidrografia, adequado à escala 1:50.000. Em aspectos operacionais, hipotetiza-se que os critérios para a formulação da modelagem geomorfológica podem ser definidos em ambiente informatizado com base em regras classificatórias a partir de modelo digital do terreno e atributos geomorfométricos derivados.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver uma proposição metodológica para mapeamento geomorfológico semiautomatizado a partir de atributos geomorfométricos derivados de modelo digital do terreno, contemplando morfometria, morfografia, morfogênese, morfodinâmica e morfocronologia.

Como itens específicos, tem-se como objetivos:

- Compreender, numa perspectiva temática e geomorfológica, como se dá a concepção, elaboração e representação de mapas geomorfológicos de diferentes países, datas e escalas, a fim de estabelecer um panorama sobre sua construção;
- Estabelecer regras de classificação orientada a objeto, de modo sistematizado, que exprima assinaturas geomorfométricas para cada item (morfométrico, morfográfico, morfogenético, morfodinâmico e morfocronológico) mapeado;
- Compor um sistema de legenda e de representação adequada à escala 1:50.000 que abranja a complexidade dos objetos geomorfológicos mapeados de modo ilustrativo para toda a área de estudo.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 GEOMORFOMETRIA

A geomorfometria é entendida, classicamente, como a ciência que trata da geometria da paisagem e das tentativas de descrever quantitativamente a superfície da Terra (CHORLEY, 1957). Conforme apontam Dikau *et al.* (1995), Pike (2000) e Pike *et al.* (2009), esse campo científico começou a se sistematizar e se desenvolver no século XVIII, sobretudo com Alexander von Humboldt. Miliaresis (2008) cita três aspectos principais que marcaram a evolução da geomorfometria: i) a orometria, com as mensurações das montanhas no século XIX; ii) a fisiografia, que corresponde à escala regional de estudos geomorfológicos no início do século XX; iii) a análise do terreno, ligada ao estudo sistemático dos elementos relacionados à origem, cronologia e composição de distintas unidades de relevo.

Em função do desenvolvimento técnico das últimas décadas, a geomorfometria passou a ser definida como a ciência da análise quantitativa da superfície terrestre (PIKE, 2000; RASEMANN *et al.*, 2004), uma moderna abordagem analítico-cartográfica para representar a topografia da Terra (TOBLER, 2000) e também um campo interdisciplinar que envolve a matemática, as geociências e, mais recentemente, a ciência da computação (PIKE *et al.*, 2009). É designada, também, como modelagem digital do terreno (EL-SHEIMY *et al.*, 2005; LI *et al.*, 2005), análise digital do terreno (WILSON; GALLANT, 2000; ZHOU *et al.*, 2008) ou análise digital do relevo (SILVEIRA, 2010; SILVEIRA; SILVEIRA, 2016).

Para Rigol-Sanchez *et al.* (2015), nas últimas duas décadas a geomorfometria teve significativo progresso devido à flexibilidade e rapidez para a realização de cálculos e mensurações com auxílio da análise computadorizada de modelos digitais do terreno (MDTs).

Evans (1972) propôs uma importante diferenciação de análise considerando a geomorfometria, dividindo-a em geral e específica. A geomorfometria geral enfatiza os parâmetros, ou seja, tem como enfoque a extração de medidas descritivas e trata a superfície de modo contínuo. A geomorfometria específica, por sua vez, prioriza a extração de feições do relevo, entendidas como objetos, e, portanto, contempla a discretização da superfície. Essa discussão é aprofundada por Mark e Smith (2004), Pike *et al.* (2009) e Dragut e Eisank (2011).

De modo aplicado, Macmillan e Shary (2009) exemplificam que a geomorfometria geral, sendo empregada para descrever a superfície contínua, proporciona a base para a comparação quantitativa de paisagens distintas qualitativamente, além de auxiliar na adaptação de métodos de análise da superfície utilizados em campos afins à geomorfologia. Já a geomorfometria específica pode ser utilizada para descrever formas de relevo discretas, como vulcões, dunas, montanhas e envolve decisões arbitrárias e subjetivas nas etapas prévias, de conceituação, e posteriores, de quantificação. Segundo Evans (2012), a geomorfometria específica também tem a função de analisar as características geométricas e topológicas das formas de relevo.

Nesse sentido, conforme Bolongaro-Crevenna *et al.* (2005), a geomorfometria considera a relação entre objetos geomorfológicos (principalmente formas de relevo) e os parâmetros numéricos usados para descrevê-los. Dessa forma, um dos principais objetivos da geomorfometria é a extração de assinaturas para a representação de objetos geomorfológicos. No contexto atual da modelagem em ambiente informatizado, tais assinaturas são extraídas em diferentes escalas espaciais de MDTs e descrevem a complexidade das formas de relevo como a síntese dessas características verificadas individualmente (SCHMIDT; ANDREW, 2005).

Além da importância da distinção entre geomorfometria geral e específica na tese apresentada, que contemplou ambas, o conceito de assinatura geométrica também norteou a construção do mapa geomorfológico proposto. Conforme proposição de Pike (1988), a assinatura geométrica é um conjunto de mensurações que possibilita descrever formas topográficas para distinguir paisagens geomorfologicamente distintas. Para indicar tais objetos a partir de descritores quantitativos, os constituintes de uma assinatura devem descrever importantes atributos das formas topográficas e utilizar diferentes valores como parâmetro para a representação de todas as feições observadas. O autor citou, ainda, que a assinatura geométrica é uma subcategoria da assinatura geomórfica, pois essa última considera muitas outras variáveis além da topografia e, como consequência, tem a capacidade de caracterizar a paisagem em sua totalidade. Por esse motivo, o presente trabalho adaptou o conceito de Pike (1988) para assinatura geomorfométrica, enfatizando os parâmetros ligados à geomorfometria.

Em relação às aplicações para a cartografia geomorfológica, Evans (2012) destacou três etapas principais da geomorfometria específica: i) concepção e definição operacional das formas de relevo; ii) delimitação, mensuração, derivação dos índices, avaliação da distribuição das frequências, inter-relação e mapeamento das formas de relevo; iii) interpretação da gênese e cronologia das formas de relevo, sendo essa a etapa mais subjetiva. Para Romstad (2001), 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 formas do relevo (ROMSTAD, 2001).

As potencialidades de aplicações recentes, entretanto, demandam atenção. Wilson (2012), citando a rápida evolução da geomorfometria devido à tecnologia disponível, com um número crescente de fontes de dados digitais, destacou os desafios relacionados ao incremento constante de parâmetros e algoritmos para processar MDEs e extrair as mencionadas medidas descritivas (parâmetros) e feições da superfície (objetos). Nessa perspectiva, tanto os valores dos parâmetros quanto as características dos objetos variam considerando diversos fatores, como o modelo matemático pelo qual são calculados, o tamanho da janela móvel para os cálculos de vizinhança e a resolução da célula do MDE.

2.1.1 Modelos digitais do terreno e atributos geomorfométricos

Conforme definição precursora de Miller (1958), um Modelo Digital do Terreno (MDT) é entendido como uma representação estatística da superfície com um sistema de pontos discretos com valores XYZ conhecidos. Com o desenvolvimento da computação, sobretudo a partir da década de 1970, os MDTs se popularizaram (DIKAU *et al.*, 1995) e atualmente muitos algoritmos e ferramentas específicas para modelagem são implementadas em *softwares* (comerciais ou de distribuição gratuita) de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) (SEIJMONSBERGEN *et al.*, 2011). Apesar das mudanças, definições mais recentes, como apresentadas por Hengl e Reuter (2009) e Evans (2012), caracterizam os modelos digitais como matrizes de pontos, em coordenadas cartesianas, com atribuição de valores de elevação (altitude).

Destaca-se, inicialmente, que há muitas divergências conceituais entre os termos adotados para indicar os modelos digitais. Conforme discutido por Li *et al.* (2005), Zhou *et al.* (2008) e Pike *et al.* (2009), o emprego de modelo digital de elevação (MDE) e modelo digital do terreno (MDT) são comumente atribuídos como sinônimos. Sopchaki (2016) realizou ampla revisão conceitual, apresentando outras terminologias, como modelo numérico do terreno (MNT) e modelo digital de superfície (MDS). Entretanto, o presente trabalho considerou a interpretação de El-Sheimy *et al.* (2005) e Jordan (2007), na qual os MDEs se referem aos valores altimétricos contemplando os objetos existentes na superfície, como árvores ou edificações, e os MDTs se referem aos valores altimétricos do terreno desconsiderando tais objetos.

Wilson e Gallant (2000) salientaram que os dados digitais de elevação são usualmente organizados em três estruturas de dados: matrizes regulares, redes triangulares irregulares e a partir de contornos, cuja utilização está condicionada à fonte dos dados ou ao método de análise escolhido. Os autores apontaram, também, que as matrizes regulares, quadradas, se popularizaram devido à simplicidade e facilidade de implementação em ambiente computacional para cálculos de atributos derivados, ainda que o tamanho das células da grade exerçam influência direta na qualidade dos resultados (como será detalhado adiante).

Conforme Nelson *et al.* (2009), há três fontes de dados para a construção de MDEs: a) técnicas de levantamento de campo, com a aquisição de pontos precisos de latitude, longitude e elevação (x, y, z); b) mapas topográficos existentes, com a derivação de curvas de nível, drenagens, lagos e pontos de elevação; c) sensoriamento remoto, com a interpretação de fotografias aéreas ou de imagens adquiridas de satélites, com destaque para a fotogrametria (métodos estereoscópicos), radares e, mais recentemente, levantamentos *Laser*.

Segundo Pike *et al.* (2009), a disponibilidade de MDEs gratuitos e com cobertura global, como o SRTM e o MDE Aster, impulsionaram e revolucionaram as aplicações em geomorfometria. Os valores de elevação do MDE Aster foram obtidos a partir do par estereoscópico de imagens do infravermelho próximo geradas no subsistema VNIR por meio de dois sensores a bordo do satélite Terra, com resolução de 30 metros. Já o MDE derivado do projeto SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), projetado para coletar medidas tridimensionais da superfície terrestre através de interferometria com o *Spaceborne Imaging Radar-C/X-Band*

Synthetic Aperture Radar (SIR-C/X-SAR), a bordo do ônibus espacial *Endeavour*, conta com duas resoluções: um segundo de arco (aproximadamente 30 metros) e três segundos de arco (aproximadamente 90 metros) (SILVEIRA, 2015).

Quanto aos parâmetros obtidos a partir dos MDTs, que constituem descritores que representam mensurações quantitativas do relevo, na literatura recebem distintas designações, como: atributos topográficos (MOORE *et al.*, 1991 e 1993; WILSON; GALLANT, 2000; SILVEIRA *et al.*, 2012 e 2013), parâmetros das formas do relevo (SPEIGHT, 1968), variáveis topográficas (VALERIANO, 2003), variáveis morfométricas (SHARY *et al.*, 2002), variáveis geomorfométricas (NICULITA, 2011; EVANS, MINÁR, 2011), informações do terreno (MARTINONI, 2002), atributos do terreno (PENNOCK, 2003; VASCONCELOS *et al.*, 2012), atributos do relevo (IPPOLITI *et al.*, 2005; SIRTOLI *et al.*, 2008) e atributos geomorfométricos (SCHMIDT; DIKAU, 1999), sendo esta última adotada no presente trabalho.

De acordo com Wilson e Gallant (2000), os atributos calculados com base nos MDTs podem ser classificados como de primeira e segunda ordem. Os atributos primários são calculados a partir de derivadas direcionais do MDT, contemplando informações como declividade, aspecto (que equivale à orientação das vertentes), curvaturas, segmentos de fluxo e área de contribuição. Já os atributos secundários são computados a partir de dois ou mais atributos primários, como o índice topográfico de umidade (ITU ou *topographic wetness index*) e o índice de potência do escoamento (IPE ou *stream power index*), que consideram a relação entre área de contribuição e declividade. Olaya (2009) classificou os atributos geomorfométricos entre locais, quando o cálculo é realizado por pequenas janelas móveis de 3x3 células, e regionais, quando o cálculo é feito para janelas móveis que consideram um contexto mais amplo associado.

Referente à crescente utilização dos MDTs e atributos geomorfométricos, muitos trabalhos recentes se atêm às problemáticas e limitações da modelagem, denotando os cuidados desde as etapas iniciais, de aquisição dos dados, até os processamentos, aplicações e derivação de produtos. A principal obra que retrata a temática, numa perspectiva sistematizada, foi publicada por Hengl e Reuter (2009). Essa análise crítica da geomorfometria é de extrema importância, uma vez que a popularização das técnicas de análise digital do relevo tenha exposto problemas

metodológicos, com propagação de erros e resultados inconsistentes (SILVEIRA; SILVEIRA, 2016b).

Um dos principais temas abordados se refere à questão da resolução dos MDTs, ou seja, o tamanho das células (que, numa perspectiva mais abrangente, também pode ser entendido como um problema de escala). Especificamente para o MDE SRTM, por exemplo, Mouratidis *et al.* (2010) realizaram uma validação das quatro versões disponíveis do modelo a partir de 60000 pontos coletados em campo (densidade de 20 pontos km⁻²) com GPS cinemático. Os resultados indicaram que, de modo geral, o SRTM v4 é a melhor versão, seguido do SRTM v2 para locais que não contemplem vazios significativos.

Miceli *et al.* (2011) avaliaram a precisão vertical dos MDEs SRTM v1, SRTM v4, MDE Aster, Topodata¹, e o *Brasil em Relevo*, da EMBRAPA, para duas áreas topograficamente distintas: uma área na região Amazônica, com relevo suave, e a Área de Proteção Ambiental (APA) de Petrópolis, Rio de Janeiro, com relevo acidentado. A metodologia empregada seguiu as regras estipuladas pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e os resultados mostraram que para ambas as áreas os modelos atendem a classe A da escala 1:100.000. Comparativamente, o modelo que obteve os melhores resultados foi o Topodata, com pontos de maior precisão no relevo forte ondulado e montanhoso.

Numa comparação entre modelos, Silveira e Silveira (2016b) analisaram por cálculos estatísticos e matriz de confusão as diferenças entre MDEs com distintas características de aquisição num recorte da Serra do Mar no estado do Paraná. Primeiramente foram avaliados os efeitos da variação do tamanho de célula (5, 10, 15 e 20 metros) de um Modelo Digital do Terreno interpolado pelo método Topogrid a partir de base vetorial planialtimétrica na escala 1:25.000, tanto para os valores de altimetria quanto para os atributos topográficos declividade, plano de curvatura e índice topográfico de umidade. Posteriormente foram realizados testes entre o MDT Topogrid e outros MDEs amplamente utilizados e de resolução mais grosseira: MDEs SRTM (90m v1, 90m v4, 30m v1, banda-C versão 4 e banda X), MDE Aster e os MDEs do acervo Topodata. Os resultados evidenciaram que a escolha do modelo deve ser condizente à escala dos dados, aos métodos de processamento, à escolha

¹ O Projeto Topodata, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), realizou um pós-processamento dos dados SRTM por *krigagem* e com resolução reamostrada para 30 metros, cujos resultados foram publicados por Valeriano (2004) e Valeriano e Rossetti (2011).

da resolução horizontal e aos algoritmos empregados no cálculo de atributos geomorfométricos.

Pipaud *et al.* (2015) citaram as desvantagens dos MDEs SRTM e Aster para estudos geomorfológicos detalhados, principalmente em regiões montanhosas, e os comparou, por análise geomorfométrica e avaliação da cognoscibilidade das formas do relevo, com o MDE TanDEM-X, que possui resolução de 12,5 metros. Além disso, os autores produziram um mapeamento geomorfológico detalhado, de modo manual, utilizando-se do MDE TanDEM-X, e os resultados demonstraram representação consistente da paisagem.

Sobre os modelos digitais de alta resolução, notadamente os produtos derivados por radares e levantamento *Laser*, como o LiDAR, Evans (2012) citou que com o detalhamento da resolução os erros técnicos diminuem, mas os erros de definição permanecem, pois alguns dados topográficos são de interesse geomorfológico e outros não. Além disso, afirma que a natureza antropogênica da superfície precisa ser aceita, pois algumas feições, ao invés de serem removidas, devem ser identificadas e delimitadas como formas de relevo específicas, analisadas separadamente do restante da superfície.

Diversos autores apontaram a dependência de escala em MDTs e, conseqüentemente, de produtos derivados (GALLANT; HUTCHINSON, 1997; SCHMIDT; ANDREW, 2005; GROHMANN; SAWAKUCHI, 2013). Hengl (2006) sistematizou diversas propostas para definição da escolha do tamanho de célula adequado para o MDT, considerando a origem e escala dos dados.

Em relação aos atributos geomorfométricos, Shary *et al.* (2002) apresentaram extensa e detalhada discussão sobre os métodos para cálculo dessas variáveis. Os autores também realizaram uma análise sobre os efeitos da resolução espacial dos MDEs nos atributos geomorfométricos, demonstrando que as variáveis locais declividade, aspecto (orientação das vertentes) e curvaturas são muito sensíveis às mudanças no tamanho da célula, sendo que as segundas derivadas (curvaturas) são mais sensíveis que as primeiras derivadas (declividade e aspecto). Além disso, o estudo evidenciou que a declividade média tende a zero conforme a resolução horizontal aumenta. O tamanho de célula do MDE, portanto, deve ser apropriado para capturar e descrever as feições da superfície de interesse para uma aplicação particular. Raaflaub e Collins (2006) demonstraram que, em muitos

algoritmos empregados, a sensibilidade dos erros de declividade diminui à medida que a análise de vizinhança aumenta.

Cabe destacar que o período atual marca, também, uma fase de grandes avanços operacionais para a derivação de atributos geomorfométricos, desde os cálculos básicos até novas proposições ou variáveis compostas. Como exemplo, Jenness (2012) desenvolveu uma extensão, denominada *DEM Surface Tools*, acoplada ao *software* ArcGIS, com opções personalizadas para cálculos de atributos geomorfométricos e possibilidade de escolha dos métodos. Rigol-Sanchez *et al.* (2015), também para o *software* ArcGIS, criaram um pacote de ferramentas, denominado *ArcGeomorphometry*, com algoritmos específicos e acessórios para a caracterização geomorfométrica. Já Macêdo e Floquet (2017), contextualizando a importância das linguagens de programação nas geociências, apresentaram uma aplicação da linguagem computacional *R* para a derivação de atributos geomorfométricos.

Um exemplo desses avanços metodológicos pode ser atribuído à rugosidade do relevo. O índice de rugosidade do terreno, proposto por Riley *et al.* (1999), se configurou como um atributo primário, de mensuração local (3x3), calculado como produto da raiz quadrada da soma da diferença de elevação da célula central em relação às oito células do entorno. Posteriormente, Hani *et al.* (2012) desenvolveram um novo algoritmo para a computação da rugosidade do relevo por análise multiescalar, célula a célula do MDT, considerando que unidades fisiográficas (montanhas, bacias e piemontes) possuem padrões de curvaturas distintas e, portanto, padrões de rugosidade igualmente distintas. Além desses, a proposta do índice de concentração da rugosidade (ICR), de Sampaio e Augustin (2014), contemplou a análise regional e local da distribuição e recorrência espacial da declividade para a identificação de unidades do relevo. Essa variedade ilustrada, que pode ser aplicada a outros atributos geomorfométricos, exemplifica as possibilidades de novas aplicações e aprimoramento de propostas consolidadas na geomorfometria moderna.

No Brasil, Guimarães *et al.* (2017) apresentaram uma proposta para automatização (utilizando-se do MDE Aster II, com resolução de 30 metros) do amplamente utilizado Índice de Dissecção do Relevo, que representa uma análise morfométrica estabelecida pelo grau de entalhamento do vale e dimensão interfluvial média. A tentativa de automatizar o cálculo do índice, comumente empregado em

mapas geomorfológicos nacionais, pode reduzir a subjetividade pela atribuição de parâmetros quantitativos para classes qualitativas (densidade de drenagem grosseira, fina, incisões fracas, fortes etc).

2.1.2 Classificações e aplicações geomorfométricas

Nesse subtópico são apresentadas e discutidas aplicações da geomorfometria para a identificação de objetos geomorfológicos específicos, com destaque para as classificações orientadas a objeto. Conforme Evans (2012), a definição das formas de relevo é uma parte essencial do mapeamento geomorfológico e, para mensurar suas características, tais objetos individualizados precisam ser separados do seu entorno. Nesse sentido, um pré-requisito para a geomorfometria específica é o contorno de limites fechados, procedimento conhecido como delimitação (que, tradicionalmente, é realizada de modo manual a partir de interpretação visual).

MacMillan e Shary (2009) apontaram cinco procedimentos principais para a organização de classificações de formas de relevo de modo automatizado: i) estabelecimento do(s) objeto(s) espacial(is) da classificação; ii) especificação e computação das variáveis de entrada; iii) extração ou criação de regras de classificação; iv) Aplicação das regras de classificação; v) estimativa e avaliação da acurácia. Os autores citaram, ainda, que todos os métodos de predição automática de classes geomórficas são baseadas na criação de regras para o estabelecimento de relações preditivas entre as variáveis de entrada (ou estatísticas das variáveis de entrada) e as classes resultantes.

Para Dikau (1990) a extração de unidades e formas do relevo a partir de MDTs demanda a definição de alguns tópicos fundamentais: i) o caráter e a definição do espaço geomorfológico; ii) como as propriedades desse espaço podem ser descritos em termos de atributos geométrico-topológicos; iii) se essas propriedades podem ser relacionadas aos processos correspondentes em dimensões multiescalares; iv) como esses atributos podem ser delimitados adequadamente a partir dos MDTs.

Os estágios da geomorfometria específica, segundo Evans (2012), contemplam: i) concepção e definição operacional dos tipos de formas de relevo; ii)

delimitação, mensuração e derivação dos índices; iii) avaliação da distribuição das frequências, inter-relação e mapeamento; iv) interpretação da gênese e cronologia, sendo essa a etapa mais subjetiva. O enfoque, portanto, abarca a concepção, a definição operacional e o processo de delimitação.

Evans *et al.* (2009) discutiram sobre as potencialidades e limitações de classificações supervisionadas e não supervisionadas. Nas supervisionadas, os atributos geomorfométricos podem ser usados para produzir um mapa mais objetivo do que aqueles delineados manualmente. Nessa proposta, as atribuições qualitativas das formas de relevo (semânticas e ontológicas) são mantidas, entretanto os atributos permitem reduzir a subjetividade operacional com base em algoritmos semiautomatizados. Nas classificações não supervisionadas há a dificuldade de interpretação dos resultados, já que as feições espaciais obtidas necessitam de conceituação posterior (significação e/ou nomenclatura) e, por esse motivo, são menos utilizadas na geomorfometria.

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

Dentre os trabalhos pioneiros no processamento sistemático de dados de elevação para computar classificações de formas do relevo ou para descrever quantitativamente a morfologia, destacam-se: Strahler (1956), Evans (1972) e Mark (1975). Nas últimas décadas, a integração de MDEs com SIGs e ferramentas recentes de análise estatística tem aumentado o poder analítico da geomorfologia moderna, com diversas propostas de classificações amparadas na análise digital do relevo. Além disso, análises complexas podem combinar muitos parâmetros e incorporar dados não topográficos (PIKE *et al.*, 2009).

Destacam-se, inicialmente, duas propostas que obtiveram destaque na identificação de feições e unidades do relevo: Wood (1996), com a classificação de seis feições elementares (picos, cumes, depressões, canais, desfiladeiros e planos), e a classificação hierárquica de formas de relevo de Dikau *et al.* (1991), com desdobramentos aplicados por Brabyn (1998), Gallant *et al.* (2005), Hrvatin e Perko

(2009) e Barka *et al.* (2011) e Silveira e Silveira (2015) no estado do Paraná. O método, adaptado da proposta manual de Hammond (1964), 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.

Quanto às propostas não supervisionadas, destaca-se o trabalho de Iwahashi e Pike (2007) que consistiu numa classificação de formas do relevo por uma árvore de decisões com base nos valores médios (geral, da metade inferior e do quarto inferior) de três atributos geomorfométricos (declividade, convexidade e textura) a partir de um MDE e suas propriedades estatísticas. A proposta se apoiou no conceito de assinatura geométrica (PIKE, 1988). Esse método foi utilizado por Bolongaro-Crevenna *et al.* (2005) e Dragut e Blaschke (2006). Stepinski e Bagaria (2009) utilizaram a proposta em Marte e, na sequência, desenvolveram um algoritmo para generalizar a classificação. No Brasil, foi aplicado por Silveira *et al.* (2014) para todo o estado do Paraná, utilizando os atributos topográficos declividade, plano de curvatura e fluxo acumulado obtidos a partir do MDE SRTM, e também por Trentin e Robaina (2016) na realização da compartimentação geomorfométrica em uma bacia hidrográfica situada no oeste do estado do Rio Grande do Sul.

Wieczorek e Migón (2014) compararam, na Polônia, um mapa morfológico delimitado manualmente com uma classificação não supervisionada, realizada por análise de agrupamento das k-médias considerando amplitude altimétrica, declividade, curvatura e aspecto, com o critério estatístico de classes homogêneas. Como resultado, os autores destacaram que embora certas formas de relevo tenham sido associadas a um grupo particular obtido pela classificação automática, outras se enquadraram em vários grupos, não demonstrando distinção nas assinaturas.

A partir de rede neural não supervisionada, Ehsani e Quiel (2008) desenvolveram um método semiautomático para analisar feições geomorfométricas e elementos de formas de relevo. O algoritmo empregado para a classificação resultou em dez classes caracterizadas pela posição morfométrica, cujo MDE de referência foi o SRTM. Em trabalho posterior (EHSANI; QUIEL, 2009) os autores acrescentaram dados das imagens *Landsat* no método para identificar elementos de paisagem.

Também amparada por redes neurais artificiais, Vilorio *et al.* (2016) aplicou um método baseado com agrupamentos *fuzzy* (pelos atributos geomorfométricos altitude, amplitude altimétrica, declividade, aspecto, plano e perfil de curvatura, área de contribuição, índice topográfico de umidade e índice de potência de escoamento) para identificar classes digitais do relevo em uma região montanhosa no centro-norte da Venezuela.

Utilizando-se de ferramentas de visão computacional ao invés da combinação de variáveis calculadas do MDT, o método apresentado por Jasiewicz e Stepinski (2013) estabeleceu uma técnica de classificação automatizada com a utilização de *geomorphons*, resultando em dez elementos de relevo de maior ocorrência. A proposta foi aplicada no cenário brasileiro por Robaina *et al.* (2016), para a realizar a compartimentação do estado do Rio Grande do Sul. Em estudo posterior, Jasiewicz *et al.* (2014) introduziram o conceito de "similaridade da paisagem", uma mensuração que avalia a afinidade entre duas paisagens com base na semelhança entre os padrões de elementos de formas de relevo.

Outro método de destaque foi apresentado por Weiss (2001), que a partir da discretização do cálculo de diferença da elevação média (WILSON e GALLANT, 2000), tendo como critério estatístico os valores de desvio padrão, propôs o índice de posição topográfica (IPT). A classificação resulta em 6 classes (matriz de um único IPT) ou até 10 classes de relevo (combinação de duas matrizes de IPT com variação de escala, ou seja, uma calculada com janela móvel de detalhe e outra generalizada), notabilizada pela representatividade das classes modeladas e simplicidade do método. Lindsay *et al.* (2015) desenvolveram uma proposta baseada na imagem integral para mensurar o desvio métrico da posição topográfica relativa a partir da elevação média.

Silveira e Silveira (2017) utilizaram a proposta do IPT para mapear formas de relevo no Paraná, comparando-a com as unidades do mapeamento geomorfológico realizado no estado (SANTOS *et al.*, 2006) e também com controle de campo em porções representativas. Foram mapeadas 10 classes: 1) Fundos de vales com forte incisão da drenagem e canyons; 2) Vales rasos e áreas de drenagem situadas no terço médio das vertentes; 3) cabeceiras de drenagens; 4) áreas situadas nos terços inferiores das vertentes ou vales abertos e em forma de U; 5) áreas planas; 6) áreas situadas nas posições intermediárias das vertentes; 7) áreas situadas nas posições superiores das vertentes, patamares superiores ou

mesas; 8) interflúvios secundários ou situados nas porções intermediárias das vertentes; 9) topos rebaixados, interflúvios, cristas intermediárias ou morros em áreas planas; 10) interflúvios elevados ou na forma de cristas elevadas e topos elevados.

A nível mundial, Dragut e Eisank (2012) propuseram uma segmentação automatizada com a utilização do MDE SRTM, realizada a partir de árvore de decisão, na qual os objetos resultantes foram divididos em subdomínios com base em limiares dados pelos valores médios e desvio padrão da elevação, respectivamente.

De maneira geral, o mapeamento morfográfico é o aspecto predominante das classificações geomorfométricas, com destaque para a representação das formas de relevo (*landforms*). Em importantes trabalhos, Mark e Smith (2004) definiram 25 tipos de formas de relevo principais e Minár e Evans (2008) classificaram as denominadas formas elementares. Conforme Evans (2012), os canais de drenagem, planícies de inundação, deslizamentos e leques aluviais são comumente delimitados e têm sido estudados pela geomorfometria específica, entretanto as vertentes têm sido tratadas de forma diferente e raramente analisadas como feição de área.

Referente à segmentação de vertentes, Klingseisen *et al.* (2008) propuseram um método para divisão em porções superiores, médias e inferiores em pontos de quebras significativas do perfil de inclinação. Posteriormente, Matsuura e Aniya (2012) desenvolveram um algoritmo para automatizar o reconhecimento e segmentação de vertentes entre cristas e vales a partir de um MDE, no Japão, apresentando concordância de $86,9 \pm 2,7\%$ em relação à segmentação manual.

Além de classificações determinísticas, a lógica *fuzzy* também é muito aplicada no mapeamento de feições geomorfológicas por considerar os problemas de delimitação subjetiva em áreas de transição. Evans (2012) cita, como exemplo, a facilidade de representar montanhas como pontos e vales como linhas e, por outro lado, as incertezas e discordâncias quando esses objetos são representados por polígonos (áreas).

Schmidt e Hewitt (2004) desenvolveram uma metodologia que objetivou modelar elementos do relevo a partir de classificação *fuzzy* da declividade e curvatura, implementada em duas etapas: i) classificação com base na geometria local (janelas locais); ii) avaliação dos elementos do relevo em seu contexto de

paisagem (com o atributo geomorfométrico regional denominado índice de posição topográfica).

Em nova abordagem, Sena-Souza *et al.* (2017) publicaram estudo que comparou os métodos supervisionados de classificação por assinaturas geomorfométricas (classificação por ângulo espectral e a distância euclidiana) a partir de medidas de similaridade e distância para o mapeamento de formas do terreno.

Ressalta-se que muitas propostas de mapeamento utilizam a análise digital do relevo como principal elemento (considerando os atributos geomorfométricos) de modo associativo a outras variáveis não morfométricas. Como exemplo, pode-se citar as seguintes publicações: Bocco *et al.* (2011), num mapeamento de formas de relevo com base na amplitude altimétrica, declividade e interpretação visual de imagens de satélite; Argyriou *et al.* (2016) com uma análise de decisão multicritérios para avaliação e mapeamento da deformação neotectônica da paisagem, considerando tanto informações geológicas, como litologia e lineamentos, quanto atributos geomorfométricos derivados do MDE Aster, como declividade, densidade de drenagem, índice topográfico de umidades e amplitude altimétrica; Vannamettee *et al.* (2014), que apresentaram um mapeamento semiautomatizado de formas de relevo com base em múltiplos pontos geoestatísticos, que utilizam informações em múltiplas localizações de células, incluindo atributos morfométricos (derivados de MDT) e atributos não morfométricos (mapeamento manual realizado em campo, utilizado como base); Dekavalla e Argialas (2017), que utilizaram os dados de batimetria do SRTM30_PLUS para regionalizar em multiescalas a topografia submarina global e atribuir as características geomorfológicas de suas feições.

Outra questão comumente analisada e discutida em publicações que aplicam a geomorfometria para identificação de formas de relevo é o fator de escala e seu impacto nas classificações resultantes. Nessa perspectiva, Schmidt e Andrew (2005) apresentaram uma abordagem para caracterizar o relevo a partir de atributos em múltiplas escalas locais com variação dos tamanhos de janela. Arrell *et al.* (2007) aplicaram uma classificação morfométrica *fuzzy* de formas do relevo, indicando que diferentes componentes da paisagem ou classes morfométricas exibem dependência de resolução.

Quanto às aplicações para mapeamento de objetos morfográficos específicos, destacam-se: Pedersen (2016), com uma classificação semiautomática

orientada a objeto para mapear de formas glaciovolcânicas; Saha *et al.* (2011), que detalharam uma abordagem automatizada para mapear *drumlins*; Podobnikar e Székely (2015), com proposta para extração geomorfométrica automatizada de talus em Marte, com base na declividade e cálculos de vizinhança da elevação; Wu *et al.* (2016), com uma proposta para delimitação automática e caracterização geomorfométrica de dolinas cársticas a partir de modelo digital derivado de LiDAR.

Referente a objetos relacionados às feições erosivas, Desmet *et al.* (1999) produziram um mapeamento preditivo de ravinas efêmeras utilizando apenas dois atributos topográficos (declividade e área de contribuição), indicando os pontos iniciais e sua trajetória. O estudo demonstrou que, em bacias hidrográficas da região central da Bélgica, as ravinas são mais controladas pela declividade. No estado do Paraná, entretanto, as ravinas estão localizadas numa região predominantemente plana (região noroeste).

Burian *et al.* (2015), com a mesma temática, estabeleceram uma relação entre os atributos geomorfométricos e ravinas, enquanto Chaplot (2013) evidenciou o impacto dos atributos geomorfométricos na caracterização da erosão.

Considerando feições fluviais, Demoulin *et al.* (2007) desenvolveram um método para identificação de terraços, a partir de MDT e gráficos de dispersão bivariados, numa relação entre declividade e altitude relativa (acima da planície aluvial) para todas as células de seções sucessivas do vale. Gallant e Dowling (2003), por sua vez, propuseram um índice para identificação de vales e mapeamento de áreas deposicionais.

Norini *et al.* (2016) elaboraram um algoritmo projetado para a detecção semiautomatizada (na Terra e em Marte) de leques aluviais, conectados à rede de drenagem, a partir da análise de MDTs. A proposta foi amparada em três regras: i) os leques ocorrem em locais de transição topográfica, seguindo a área do canal, quando há a mudança dos vales confinados para a planície não confinada; ii) os leques possuem forma cônica de declividade relativamente alta; iii) A declividade da superfície cônica do leque aluvial é definida pela diferença de elevação e pela distância entre o ponto mais alto e mais baixo.

Outra proposta para mapeamento de leques aluviais foi apresentada por Pipaud e Lehmkuhl (2017), com um método supervisionado para delimitação a partir do MDE SRTM e com uso de uma máquina de vetor de suporte para a classificação.

Nesse estudo, foram utilizados os atributos geomorfométricos declividade, curvatura, aspecto (orientação das vertentes), *White Top Hat* (WTH) e *Black Top Hat* (BTH).

Salienta-se o potencial de aplicação da geomorfometria para mapeamento de feições erosivas numa perspectiva de evolução (morfodinâmica e morfocronológica) do relevo. A publicação de Rodriguez *et al.* (2002) é um das pioneiras a enfatizar essa relação na modelagem, cujo trabalho apresentou a função *Black Top Hat* (apresentada na seção como ferramenta aplicada em MDEs para estimar incisões fluviais numa bacia hidrográfica em área montanhosa. Posteriormente, Riquelme *et al.* (2008) utilizaram a proposta para mensurar taxas de denudação de longo-termo na porção da Cordilheira dos Andes, no Chile, e Luo *et al.* (2015) empregaram o método para estimar volumes erodidos em Marte, com aumento progressivo da janela móvel para cálculo do atributo *Black Top Hat*.

Cavalli *et al.* (2017) apresentaram uma proposta que possibilitou a avaliação de variações de elevação e estimativa de alterações volumétricas ao longo do tempo, resultante da diferença entre dois MDTs. No âmbito de aplicações com enfoque no transporte de sedimentos, essa diferenciação entre MDTs permite uma representação quantitativa e espacialmente distribuída da erosão e deposição no intervalo de tempo analisado. No estudo apresentado, dois MDTs de alta resolução derivados de dados LiDAR (2 metros), adquiridos em 2005 e 2011, foram utilizados para caracterizar as variações topográficas causadas pela erosão, transporte e deposição de sedimentos em duas bacias de montanha adjacentes.

Discussões amplas e atuais sobre os modelos de evolução da paisagem (*landscape evolution model*) são apresentadas por Tucker e Hancock (2010), que destacam a sofisticação e popularização de uso dos modelos numéricos aplicados à interpretação da evolução de paisagens fluviais, e Chen *et al.* (2014), que trouxeram uma detalhada revisão das equações fundamentais que compõem os modelos de evolução da paisagem.

Em aplicações mais direcionadas à morfodinâmica, Akgün e Türk (2011) mapearam suscetibilidade à erosão, na Turquia, por estatística multivariada, incluindo os atributos geomorfométricos declividade, densidade de lineamentos estruturais, densidade de drenagem, índice de potência do escoamento e perfil de curvatura, associados a outras variáveis como uso do solo e resistência das rochas. Já Meyer *et al.* (2014) realizaram um mapeamento preditivo de corridas de detritos, realizado com base num inventário de 429 eventos registrados entre 1979 e 2008 e

com os atributos geomorfométricos declividade, curvatura total e área de contribuição para computar as probabilidades posteriores de ocorrência das corridas de detritos. Conforme o estudo, o modelo que utilizou declividade e área de contribuição foi o que apresentou melhor desempenho preditivo.

Por fim, destacam-se trabalhos que objetivaram identificar paleosuperfícies a partir de atributos geomorfométricos, cuja modelagem permite interpretações acerca da morfocronologia. Numa perspectiva indireta, ou seja, considerando variáveis afins à morfometria, Elez *et al.* (2016) criaram modelos paleotopográficos com interpolações a partir da topografia atual (MDT), geologia (marcados estratigráficos) e indicadores geomorfológicos. De modo direto, Jarsve *et al.* (2014) apresentaram o método de ajuste de superfície com a utilização de mínimos quadrados para o mapeamento de peneplos e destacaram o potencial dos modelos para representarem superfícies geológicas com redução de trabalhos de campo (necessários para a validação).

Com aplicação no Primeiro Planalto Paranaense, Soares e Riffel (2006) produziram um mapeamento preditivo de paleosuperfícies a partir da combinação de atributos das curvas hipsométricas e propriedades morfométricas derivadas do MDE SRTM. O método contemplou seis regras quantitativas: i) elevação máxima para um segmento ajustado; ii) elevação mínima para um segmento ajustado; iii) distância altimétrica em relação ao nível de base mais próximo; iv) declividade máxima como função da altitude; v) perfil de curvatura com tolerância > 0 ; vi) plano de curvatura com tolerância > 0 .

Para a simulação dos cenários de paleorelevo pré-holocênico, numa pequena bacia hidrográfica do estado do Rio de Janeiro, o método de Pelech (2016) considerou amostragem dos pontos de topo e das linhas de cumeada do relevo atual (elevações máximas) assumindo que tais pontos configuram remanescentes do paleorelevo, equivalentes às interpretações de superfícies aplainadas. Na proposta, os valores inversos da acumulação de fluxo foram utilizados para determinação dos topos e cristas, seguido da interpolação a partir desses níveis estabelecidos.

Grohmann *et al.* (2011) discutiram sobre a aplicação do mapa de nível de base a partir do MDE do SRTM30 PLUS, com resolução de aproximados 900 metros, como método para de identificar áreas com possível influência tectônica mesmo dentro de domínios litologicamente uniformes na região amazônica.

De modo aplicado à discussão sobre as superfícies de erosão no Brasil, numa interpretação tendo em vista o contexto geológico e as teorias de evolução do relevo em longo-termo, o estudo de Grohmann e Riccomini (2012) avaliou que a integração entre dados morfométricos, termocronológicos e geofísicos não condiz com a validade do uso de superfícies aplainadas em correlações estratigráficas de âmbito regional.

Outro trabalho de destaque, publicado por Haider *et al.* (2015), apresentou um método de mapeamento de peneplanos utilizando apenas atributos geomorfométricos, derivados do MDE SRTM, numa abordagem *fuzzy*. Conforme o estudo realizado, os parâmetros para a representação adequada dos topos planos, interpretados como peneplanos, foram: declividade (0 e 10°), curvatura (-0,14 m⁻¹ e +0,14 m⁻¹), índice de rugosidade do terreno (0 e 80 metros) e (iv) altitude relativa (100 a 600 metros).

2.2 CARTOGRAFIA GEOMORFOLÓGICA

A cartografia geomorfológica se configura como ferramenta essencial para a compreensão da superfície terrestre, pois fornece uma descrição completa das formas de relevo identificadas com denominações específicas e representadas por símbolos apropriados (DRAMIS *et al.*, 2011), sendo um instrumento tanto de análise quanto de síntese (FLORENZANO, 2008). Pode ser entendida como o recurso gráfico ligado à interpretação de dados competentes à geomorfologia (RODRIGUES, 2010) e, em função dessa especificidade analítica, Tricart (1965) pondera que o mapa geomorfológico se refere à base da pesquisa e não à concretização gráfica da pesquisa realizada.

Conforme contextualização apresentada por Florenzano (2008), Verstappen (2011) e Coltrinari (2011), o mapa de Passarge, de 1914, é um marco pioneiro por trazer uma representação completa do relevo, incluindo informações referentes aos processos de evolução e idade das formas cartografadas. Até então os mapas topográficos permitiam apenas a diferenciação de atributos morfológicos e morfográficos, com representações simplificadas com hachuras, desde o século XVIII, e curvas de nível, desde o século XIX (KLIMASZEWSKI, 1982). Segundo Coltrinari (2011), a publicação de Passarge incluía oito mapas: i) topo-orográfico

com vegetação; ii) declividade das vertentes; iii) formas de vales; iv) geológico-estratigráfico; v) resistência física; vi) resistência química; vii) petrográfico; viii) desenvolvimento do relevo, os elementos desse relevo e sua evolução, a estrutura do substrato e sua suscetibilidade ao intemperismo.

Entretanto, somente após a Segunda Guerra Mundial a cartografia geomorfológica passou a ser notabilizada, principalmente com o auxílio de fotografias aéreas que possibilitaram o desenvolvimento de estudos detalhados do relevo (em escalas 1:50.000 ou maiores) considerando as relações entre embasamento, clima e gênese das formas observadas (COLTRINARI, 2011). As décadas de 1950 e 1960 marcaram, portanto, uma importante fase de estruturação da cartografia geomorfológica a partir de congressos internacionais que objetivaram aprofundar a discussão da temática numa perspectiva integradora. À época, os resultados sistematizados pela Subcomissão de Mapeamento Geomorfológico da União Internacional de Geografia (UGI), pertencente à Comissão de Geomorfologia Aplicada, culminaram na realização de um manual para mapeamento geomorfológico detalhado e de média escala, publicado por Demek (1972).

Referente a esse período, Verstappen (2011) destaca o desenvolvimento inicial do mapeamento geomorfológico na Europa e Austrália, enfatizando as distintas proposições cartográficas de cada país e a variedade na construção de legendas. Em função da complexa variedade de objetos estudados pela geomorfologia, Florenzano (2008) cita que mesmo com os esforços na busca de uma sistematização metodológica internacional, a exemplo do que ocorre com as cartas geológicas, não há um padrão unificado e de aceitação majoritária para a produção de mapas geomorfológicos.

Apesar das dificuldades de normatização, há um consenso, desde os mencionados congressos, que os mapas geomorfológicos devem atender seis pontos principais: i) prover uma descrição completa e objetiva das formas de relevo (morfografia); ii) incluir informações sobre suas propriedades espaciais, como dimensões, inclinação e curvatura (morfometria); iii) relatar sua origem e evolução em relação aos agentes e processos genéticos endógenos e exógenos (morfogênese), considerando também os efeitos da litologia e controle estrutural; iv) indicar a idade relativa ou absoluta (morfocronologia) das formas de relevo; v) apresentar a situação de atividade do relevo e taxa de processos genéticos

(morfodinâmica); vi) indicar as formações rochosas e os depósitos superficiais (DRAMIS *et al.*, 2011).

Dessa forma, os mapas geomorfológicos diferem de outros produtos temáticos do relevo por representarem, de modo integrado, morfologia (morfometria e morfografia), morfogênese, morfocronologia e morfodinâmica. Segundo Doornkamp (1971), o termo "morfológico" é empregado para somente indicar determinada forma da superfície, enquanto o termo "geomorfológico" é utilizado buscando a interpretação dessa mesma forma.

Além dos aspectos básicos, Kohler (2001) cita as quatro dimensões da abordagem do relevo terrestre. As duas primeiras se referem à representação de uma feição geomorfológica do relevo feita em planta em uma folha de papel, sendo que para se representar o volume (massa), recorre-se à terceira dimensão através da curva de nível. A sucessão de curvas de nível pode representar feições do relevo, como a forma de uma vertente. E, por fim, para se representar a dinâmica das formas do relevo, recorre-se à sucessão de cenários temporais (quarta dimensão), os quais são registrados através de simbologia adequada.

Dramis *et al.* (2011) categorizaram os mapas geomorfológicos como básicos e derivados, denominados por Verstappen (1977) como mapas geomorfológicos analíticos e pragmáticos, respectivamente. Para Otto e Smith (2013), os mapas básicos representam as feições observadas na paisagem, enquanto os derivados enfatizam um tema ou aplicação específica. Nesse sentido, conforme Dramis *et al.* (2011), os mapas geomorfológicos básicos podem ser elaborados sob duas perspectivas diferentes: ênfase sobre a evolução da paisagem ao longo do tempo geológico (mapas de morfoevolução) ou sobre os processos geomorfológicos que afetam a área de estudo (mapas morfodinâmicos). Já os mapas geomorfológicos derivados são obtidos através da seleção, generalização e reutilização de dados apresentados em mapas básicos com o objetivo de zonestar a distribuição espacial ou temporal de processos geomorfológicos significativos, tais como deslizamentos, inundações, deformações superficiais, erupções vulcânicas e tsunamis.

Em relação aos mapas geomorfológicos derivados, Paron e Claessens (2011) realizaram discussão sobre a necessidade de integração desses documentos em programas nacionais de zoneamento de áreas de risco e planejamento da paisagem, apresentando os mapeamentos básicos da Alemanha, Espanha, Países Baixos, Itália, Romênia, Austrália, China e Brasil.

Devido a essas especificidades apresentadas, Rodrigues (2010) afirma que um mapa geomorfológico deve ser apoiado em critérios de representação gráfica bem definidos, a fim de otimizar a leitura e facilitar a interpretação dos fenômenos geomorfológicos. E, dentre todas as problemáticas relacionadas à representação e interpretação, a legenda é uma das questões centrais. Conforme St-Onge (1981) *apud* Coltrinari (2011), "o elemento essencial de uma carta geomorfológica é sua legenda. É ela que requer rigor intelectual; é também nela que a falta de rigor é facilmente percebida". Em aspectos operacionais, "a legenda do mapa deve ser organizada de tal forma que a descrição e a interpretação estejam separadas", e, referente à leitura do documento cartográfico, "deveria ser possível a quem estudasse o mapa chegar a uma conclusão diferente daquela do autor. Se os dados não podem ser reinterpretados, o mapa não passa de uma simples ilustração do autor" (p. 121).

Para Verstappen (2011), as legendas de mapas geomorfológicos analíticos (básicos) tendem a ser muito complexas pela diversidade de dados a serem incluídos nas características morfométricas, morfográficas, morfogenéticas, morfocronológicas e morfodinâmicas do relevo e, por esse motivo, os produtos cartográficos geralmente contêm grande quantidade de informações e possuem alto valor científico. Para o autor, a padronização completa da legenda só é necessária para mapeamentos de nível nacional ou internacional.

Otto *et al.* (2011) apresentaram uma contextualização das técnicas cartográficas e suas aplicações em mapeamento geomorfológico com foco nos principais sistemas de legendas propostos até então. Segundo os autores, para representar a complexidade do relevo, diferentes tipos de símbolos, cores e demais elementos cartográficos precisam ser organizados cuidadosamente para a obtenção de um mapa legível que expresse claramente o conteúdo proposto. Além disso, destacam quatro questões que devem nortear a etapa prévia de construção: i) Qual é o propósito, a mensagem e o aspecto central do mapa?; ii) A quem o mapa será destinado? iii) Quem utilizará o mapa? iv) De que forma o mapa será utilizado, ou seja, em escritório, em campo ou como recurso didático?

Demek (1967) cita que a principal forma de representação em um mapa geomorfológico é a cor, sendo que toda cor apresenta duas possibilidades de expressão: a cor em si e suas tonalidades. Tendo como base as variáveis visuais utilizadas na simbologia, Souza *et al.* (2004) destacam que "a execução de um

documento cartográfico deve seguir precisamente a linguagem da Semiologia Gráfica (...), que está diretamente associada à informação e à transmissão de conhecimentos” (p. 138). Os autores também enfatizam que as variáveis visuais do sistema de símbolos da linguagem cartográfica tradicional foram gradativamente substituídas por cor e hachuras representadas por pontos, linhas e polígonos vetorizados da cartografia digital.

Para Klimaszewski (1982), a dificuldade de padronização de legenda se deve às especificidades locais de cada mapeamento, como a influência das linhagens epistemológicas, características geomorfológicas da área, disponibilidade de dados e objetivos pretendidos. Na presente tese, a seção 4.1 traz uma discussão específica sobre a constituição das legendas e a representação de aspectos geomorfológicos a partir de variáveis visuais ligadas à cartografia temática, com a análise de 57 mapas geomorfológicos (cujos procedimentos metodológicos constam na seção 3.1).

Além da legenda, outra problemática inerente aos mapas geomorfológicos se refere à questão da escala, tanto espacial quanto temporal, sendo limitada aos objetivos do projeto (DRAMIS *et al.* 2011). Segundo Kohler (2001), em função da dinâmica dos processos geomorfológicos, que ocasionam constantes mutações nos cenários ambientais, a escala na análise geomorfológica deve ser compreendida como espaço-temporal. Rodrigues (2010), por sua vez, aponta que a questão temporal se configura como uma variável que a cartografia geomorfológica tem dificuldade para representar.

Nesse quesito, a publicação de Tricart (1965) representa um marco na utilização de uma escala espaço-temporal para fundamentar as pesquisas geomorfológicas. A classificação taxonômica das formas do relevo se baseia num princípio dinâmico e outro dimensional (FIGURA 11). Contemporaneamente ao trabalho de Tricart, a escola francesa, amparada pela concepção geossistêmica da paisagem, proposta por Bertrand (1968), retomou os trabalhos pioneiros da abordagem holística, enquanto a escola russa introduziu os conceitos de morfoestrutura e morfoescultura (MESCHERIKOV, 1968; GERASSIMOV; MESCHERIKOV, 1968) na classificação do relevo terrestre (KOHLE, 2001). Todas essas propostas refletiram na concepção escalar da produção de mapas geomorfológicos.

Ainda em relação ao componente escalar dos mapas geomorfológicos, Dramis e Bisci (1998) propuseram uma categorização relacionando a escala cartográfica com os segmentos mínimos e máximos mapeáveis (TABELA 1). Assim, conforme a proposta, um mapa geomorfológico 1:50.000, considerado como de média escala, não pode representar objetos maiores que 20 km e menores que 100 metros (que, no mapa, representam 40 cm e 0,2 cm, respectivamente). Esses valores são importantes por indicarem um parâmetro de referência, já que as descrições de “pequena escala” ou “grande escala” podem se tornar subjetivas dependendo do contexto empregado.

TABELA 1 - CATEGORIAS E ESCALAS DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS

Categoria de escala	Escala	Segmentos mínimos (0,2cm) / máximos (40cm) mapeáveis (km)
	< 1:1.000.000	> 400 / > 2
Pequena	1:1.000.000 - 1:500.000	400 / 2 - 200 / 1
	1:500.000 - 1:250.000	200 / 1 - 100 / 0,5
Média	1:250.000 - 1:100.000	100 / 0,5 - 40 / 0,2
	1:100.000 - 1:50.000	40 / 0,2 - 20 / 0,1
	1:50.000 - 1:25.000	20 / 0,1 - 10 / 0,05
Grande	1:25.000 - 1:10.000	10 / 0,05 - 0,4 / 0,02
	1:10.000 - 1:5.000	0,4 / 0,02 - 0,2 / 0,01
	> 1:5.000	< 0,01

FONTE: adaptado de Dramis and Bisci (1998)

No Brasil, destacam-se as contribuições precursoras de Ab'Saber, sobretudo a partir da década de 1950 com as primeiras transcrições gráficas de interpretações sobre o relevo de regiões específicas e representativas do país que, posteriormente, foram sistematizadas a nível nacional (AB'SABER, 1964; 1969; 1998). A ênfase na concepção dos mapas priorizou a morfologia (mega e macroestruturas) associadas à morfogênese (tal como a teoria das superfícies de aplanamento).

Os trabalhos de Ab'Saber (op. cit.) embasaram a construção metodológica para os mapas geomorfológicos do Projeto RADAMBRASIL, desenvolvido durante a década de 1970 e que resultou em 38 folhas ao milionésimo cobrindo todo o território brasileiro. Barbosa *et al.* (1984, p. 9) cita que "até 1968, a experiência acumulada no Brasil sobre mapas geomorfológicos era pequena, díspare em escalas e geralmente calcada em modelos estrangeiros".

Segundo o autor (op. cit.), que discorreu sobre a evolução da metodologia, seis princípios fundamentaram os mapas geomorfológicos do RADAMBRASIL: i)

base geológica como elemento essencial; ii) fixação, delimitação e descrição precisas das formas de relevo em si mesmas; iii) fixação da altimetria; iv) representação dos domínios morfoclimáticos e morfoestruturais; v) representação da dinâmica da evolução geomorfológica atual; vi) cartografia das formações superficiais.

Conforme apresentação realizada por Florenzano (2008), apesar da pequena escala, de 1:1.000.000, o sistema de legenda, aberto e flexível, permitiu acréscimos e adaptações decorrentes da evolução da metodologia dos mapas geomorfológicos do Projeto RADAMBRASIL. A partir de vários documentos, referentes a diversas épocas e autorias, redigidos ao longo da existência do mencionado projeto, foi elaborado um manual técnico que apresentou uma metodologia para mapeamento geomorfológico, publicado pelo IBGE (2009), cuja primeira versão é datada de 1995.

A proposta taxonômica desse manual teve como princípio básico o ordenamento dos fatos geomorfológicos de acordo com uma classificação temporal e espacial, na qual se distinguem os modelados como unidade básica e seus grupamentos hierarquicamente relacionados. Para a individualização destes conjuntos de feições, foram considerados como parâmetros fatores causais, de natureza estrutural, litológica, pedológica, climática e morfodinâmica, responsáveis pela evolução das formas do relevo e pela composição da paisagem no decorrer do tempo geológico. De acordo com a ordem decrescente de grandeza podem ser identificados: Domínios Morfoestruturais, Regiões Geomorfológicas, Unidades Geomorfológicas, Modelados e Formas de Relevo Simbolizadas. Os Modelados, por sua vez, podem ser categorizados em: Acumulação, Aplanamento, Dissecação e Dissolução (IBGE, 2009).

Outra importante contribuição brasileira foi publicada por Ross (1992), que, com base na escola russa citada anteriormente, propôs seis níveis taxonômicos para a classificação hierárquica do relevo. O primeiro táxon constitui o domínio morfoestrutural, que é definido pelo agrupamento de fatos geomorfológicos provenientes de amplos aspectos geológicos. O segundo representa o subdomínio morfoestrutural, que se caracteriza por uma compartimentação reconhecida regionalmente. O terceiro é representado pelas unidades de relevo e se refere aos compartimentos bastante individualizados. O quarto táxon refere-se às formas de relevo individualizadas na unidade de padrão de formas semelhantes (como as

planícies fluviais ou marinhas, terraços fluviais ou marinhos, colinas, morros e cristas). O quinto táxon se refere às partes das vertentes ou setores das vertentes de cada uma das formas do relevo. O sexto táxon, por fim, corresponde às pequenas formas de relevo que se desenvolvem por interferência antrópica direta ou indireta, como ravinas, voçorocas e assoreamentos, e também aos processos morfodinâmicos recentes.

2.2.1 Mapeamento geomorfológico no âmbito da cartografia temática

Devido à miscelânea de representações possíveis sobre o relevo e ao elevado número de objetos a serem cartografados, mapas geomorfológicos se caracterizam como complexos documentos temáticos. O nível de abstração dos fatos geomorfológicos, num mapa, varia conforme as concepções e escalas têmporo-espaciais do projeto, conforme os conceitos teóricos adotados e conforme as especificidades do relevo local, o que justifica as dificuldades de replicação de sistemas de legendas (DEMEK, 1972; KLIMASZEWSKI, 1982; KOHLER, 2001; SOUZA *et al.*, 2004; FLORENZANO, 2008; RODRIGUES, 2010; DRAMIS *et al.*, 2011; COLTRINARI, 2011).

A preocupação em atribuir significados às formas a partir de símbolos compreensíveis pode ser evidenciada desde aquele que é considerado como um dos registros mais antigos: o mapa de Ga-Sur, datado com aproximados 4500 anos (2500 a. C), da civilização mesopotâmica. Na inscrição, feita numa placa de barro cozido, as montanhas que circundam o rio Eufrates são representadas com “V” e “U” invertidos e sobrepostos numa sequência linear. Muitos mapas geomorfológicos, hoje, apresentam cordilheiras com simbologia semelhante. Isso evidencia as associações com a geometria da paisagem, que podem servir como soluções cartográficas primárias para representações temáticas (SILVEIRA, 2019).

Nesse contexto, os mapeamentos do relevo se desenvolveram de modo concomitante à evolução da Cartografia Temática. Archela (1999) destaca que os mapas possuem uma tripla função de comunicação linguística: registrar, tratar e comunicar. Considerando que a Cartografia é um sistema espacial que utiliza uma linguagem visual, Oliveira (2005) cita que a percepção do conteúdo cartografado é instantânea, pois "quando se olha para um mapa, o que chama a atenção

primeiramente é a imagem formada pelo conjunto de signos: cores, formas, texturas, tonalidades" (p. 31).

Segundo Martinelli (2007), a elaboração de mapas temáticos se inicia a partir da delimitação da parte da realidade a ser problematizada pelo autor interessado na realização da representação, "com vistas a estabelecer diretrizes que orientem a busca de respostas às questões a ela colocadas. Define-se, assim, o tema" (p. 33).

Conforme Archela e Archela (2002), as questões teóricas vinculadas à Cartografia Temática começaram a se estruturar em duas fases: no final do século XIX, com a Revolução Científica, e posteriormente, de modo mais efetivo, a partir da década de 1960, com as perspectivas das correntes teóricas da Comunicação Cartográfica (Teoria da Informação, Teoria da Modelização, Teoria da Cognição, Teoria Geral dos Signos e Visualização Cartográfica).

Para Queiroz (2007), a primeira fase, durante a divisão do trabalho científico, resultou nas reflexões iniciais sobre as características dos mapas temáticos a partir das exigências da época. Ficou marcada pelo início da sistematização das representações específicas que cada novo ramo do conhecimento demandava (dentre as quais a geomorfologia) e também pelo processo de organização de uma metodologia para as representações gráficas. A compreensão do mapa, portanto, estaria condicionada ao processo de comunicação por uma *sintaxe* (linguagem) gráfica — sobrepondo elementos estéticos ou artísticos, com ênfase na transposição do conteúdo. Iniciou-se, assim, a era da Cartografia Científica.

Já na segunda fase, com ênfase na Comunicação Cartográfica, cada corrente teórica da Cartografia evidenciou questões pertinentes sobre o processo de simbolização e a elaboração de mapas temáticos. Na Teoria da Informação o mapa é tido como um veículo de informação e os símbolos têm a função de transpor uma mensagem; na Teoria da Modelização, o mapa é um modelo da realidade e os símbolos traduzem conceitos; na Teoria da Cognição, o mapa configura-se como fonte variável de informação, na qual a escolha dos símbolos deve ser adequada às especificidades cognitivas dos usuários; na Teoria Geral dos Signos, amparada pela Semiologia Gráfica, os mapas são um conjunto de signos que compõem uma linguagem universal, monossêmica; e na Visualização Cartográfica, o aparato tecnológico permite novas possibilidades de transposição do conteúdo e

simbolização para além de representações no papel (GIRARDI, 2003; QUEIROZ, 2007; SILVEIRA, 2019).

Concomitante às questões conceituais e dos frutíferos debates da Cartografia Temática em meados do século XX, Martinelli e Graça (2015) citam a importância da produção de Atlas Nacionais após a Segunda Guerra Mundial como símbolo de soberania de nações que conquistaram sua independência. Nos Atlas Nacionais, os mapas geomorfológicos são produtos temáticos essenciais e, portanto, as publicações foram importantes marcos para a difusão e avanço da cartografia geomorfológica.

Ressalta-se que cada corrente teórica da Cartografia trouxe, direta ou indiretamente, reflexos na elaboração de mapas geomorfológicos. Dentre elas, destacam-se a Teoria da Informação, a Teoria Geral dos Signos (Semiologia Gráfica) e, mais recentemente, a Visualização Cartográfica (contemplada pelo capítulo 2.2.2, adiante).

A Teoria da Informação, que considera o mapa como um veículo de informação, foi uma das precursoras na inserção dos conceitos sobre comunicação cartográfica. Nessa abordagem, a criação e a utilização dos mapas compõem um mesmo processo. O sistema considera a seguinte relação: Emissor ↔ Mensagem ↔ Receptor. Na comunicação visual, essa relação pode ser traduzida pelo transmissor (cartógrafo), canal de transmissão (mapa) e o receptor (usuário). Nesse esquema, pode-se entender que a comunicação é polissêmica, ou seja, permite várias possibilidades de interpretação sobre o conteúdo do mapa. Assim, uma única representação pode ter significados diferentes para distintas pessoas (MARTINELLI, 1991).

Como contraposição à comunicação polissêmica, a Semiologia Gráfica aplicada à Cartografia Temática resultou na Teoria Geral dos Signos. Para Archela (2001, p. 45), "a semiologia gráfica pode ser compreendida como um conjunto de diretrizes que orientam a elaboração de mapas temáticos com o uso de símbolos caracterizadores da informação".

A principal contribuição para o estabelecimento dessa corrente advém do francês Jacques Bertin, que considerava a Cartografia como uma linguagem universal e, portanto, monossêmica. A sistematização de uma linguagem gráfica tendo como base um sistema de símbolos gráficos com significado (expressão do

conceito) e significante (expressão gráfica), de modo simultâneo, eliminaria a ambiguidade no processo de comunicação cartográfica (BERTIN, 1967).

A proposta de Bertin (1967) de sistematizar uma linguagem gráfica para a Cartografia foi um marco para as representações temáticas — considerada como a "gramática da Cartografia Temática" apoiada pela percepção visual. O rompimento com a lógica polissêmica (Emissor ↔ Mensagem ↔ Receptor) buscou eliminar as interpretações dúbias dessa relação, considerando que os signos gráficos não devem ser escolhidos de modo arbitrário, mas sim a partir de regras lógicas para a compreensão imediata.

No sistema monossêmico (significado único), no qual emissor e receptor devem estar na mesma situação perceptiva, Bertin (1967) considerou inicialmente três relações entre os dados que compõem um mapa temático:

- i) Similaridade (=) / Diversidade (≠);
- ii) Ordem (O);
- iii) Proporcionalidade (Q).

A partir do reconhecimento das relações entre os dados, a representação gráfica pode ser estabelecida pelo emprego das variáveis visuais, que contemplam seis possibilidades de percepção da retina:

- Tamanho;
- Forma;
- Cor;
- Valor (ou intensidade);
- Orientação;
- Textura (ou granulação).

Além das seis variáveis visuais, há ainda as duas dimensões do plano que se referem à posição ou localização dos elementos, ou seja, os eixos X e Y, respectivamente. A FIGURA 3 ilustra as possibilidades de aplicação de cada uma das variáveis visuais para distinguir, nesse caso, dois elementos (objetos A e B) pontuais.

Por fim, cada variável visual pode ser implantada graficamente de três maneiras: como ponto, como linha ou como área (ou zona). Os modos de implantação são também denominados de primitivas gráficas (SILVEIRA, 2019).

Algumas adaptações da proposta de Bertin (1967) obtiveram destaque por contemplar novos elementos e novas aplicações das variáveis visuais. Dentre elas,

evidencia-se a sistematização de Slocum (1998) — atualizada por Slocum *et al.* (2009) —, que concebeu três novas variáveis visuais: espaçamento, arranjo (que se assemelham à textura) e altura em perspectiva. Além dessas, ainda considerou a divisão da cor em matiz, brilho e saturação.

FIGURA 3 – VARIÁVEIS VISUAIS DE BERTIN (1967) COM APLICAÇÃO PONTUAL

	Posição	Forma	Tamanho	Cor	Valor	Textura	Orientação
Objeto A							
Objeto B							

FONTE: adaptado de Olaya (2014)

Considerando os mapas geomorfológicos, outra importante contribuição de Slocum (1998) foi em relação ao modo de implantação, que além dos pontos, linhas e áreas incluiu a possibilidade de representações volumétricas em 2,5D e também representações tridimensionais (3D). As representações em 2,5D podem ser entendidas como uma superfície (o próprio relevo), enquanto as representações em 3D se referem aos objetos sobre essa superfície.

Destaca-se, em suma, que os pressupostos da Semiologia Gráfica são essenciais para o êxito da comunicação e representatividade de mapas geomorfológicos, cujos produtos temáticos abarcam o uso das variáveis visuais aplicadas com distintos modos de implantação para a transcrição gráfica das propriedades do relevo — tal como será evidenciado ao longo da tese, nos capítulos 3.1 e 4.1, com a análise de 57 mapas geomorfológicos.

No entanto, apesar das diretrizes aplicadas à confecção de mapas temáticos, hoje os mapas podem ser produzidos facilmente por pessoas que desconhecem os preceitos da Cartografia, gerando muitos produtos de qualidade dúbia, com símbolos mal selecionados — simbologia inapropriada para os dados utilizados —, cores aleatórias e um *design* ineficiente (DENT, 1999).

Além disso, a disponibilidade cada vez maior de dados e a facilidade de processamento e visualização de informações espacializadas imbricam algumas questões teóricas para reflexão. Conforme Sampaio (2012), a construção de um número significativo de mapas temáticos com os mais diferentes temas e escalas de

representação não tem implicado, necessariamente, em maior eficácia na comunicação gráfica.

2.2.2 Mapeamento geomorfológico em ambiente digital

Nas últimas décadas, a transição da cartografia analógica para a cartografia digital (RODRIGUES, 2010) e as novas ferramentas para mapeamento geomorfológico, como o sistema de posicionamento global (GPS), dados de imageamento por satélite, modelos digitais de elevação de alta resolução e o desenvolvimento dos Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) (DRAMIS *et al.*, 2011), configuraram uma nova etapa para a representação cartográfica do relevo.

Segundo Souza *et al.* (2004, p. 137), a "aplicação de técnicas de Semiologia Gráfica para a visualização de dados é um pressuposto da cartografia moderna, principalmente no que diz respeito aos métodos condicionados a um sistema integrado de ferramentas SIG, que possibilitam a manipulação, armazenamento, representação gráfica e a análise das informações". Para Dramis *et al.* (2011), os documentos cartográficos tradicionais configuram "mapas estáticos", enquanto num SIG podem ser considerados como "mapas dinâmicos".

Diversos trabalhos discutem sobre as mudanças observadas em função dessas novas potencialidades (e, conseqüentemente, das antigas limitações). Gustavsson *et al.* (2008), por exemplo, apresentaram uma base de dados geomorfológica padronizada (incluindo vetores, matrizes e tabelas) para ser utilizada como apoio para projetos de mapeamentos digitais; Smith *et al.* (2011) descreveram os novos métodos de visualização das formas de relevo a partir da organização de dados espaciais em uma estrutura de dados digitais; Bishop *et al.* (2012) destacaram a necessidade de incluir conceitos geomorfológicos nas etapas de desenvolvimento das ferramentas automatizadas em ambiente SIG, para que a parametrização seja pautada em critérios científicos bem estabelecidos; Otto e Smith (2013) realizaram discussão abrangente sobre a evolução do mapeamento geomorfológico, desde os mapas manuais de campo até os mapas no contexto digital, tanto de modo manual quanto semiautomatizado, além de discutirem a apresentação dos resultados, construção das legendas e publicação *online* dos produtos cartográficos.

Dikau (1989) evidenciou a importância da aplicação de SIGs como ferramenta para a gerência e análise numérica de dados visando o mapeamento geomorfológico, criando o termo “sistemas de informações geomorfológicas”, também utilizado por Mentlík *et al.* (2006), Minár e Evans (2008), Bocco *et al.* (2011) e Dramis *et al.* (2011). Para esses últimos autores, o mapa geomorfológico digital deve atender para algumas problemáticas associadas: interoperabilidade, adequação multiescalar, hierarquização taxonômica e clareza nas definições do mapeamento orientado ao objeto, além de ser um produto compreensível, aplicável, reproduzível e flexível operacionalmente. Já para Bocco *et al.* (2011), as aplicações computadorizadas para mapeamento geomorfológico requerem considerações fundamentais sobre aspectos temporais, espaciais e disponibilidade de dados básicos, sendo que a estrutura de um sistema de informações geomorfológicas deve distinguir: i) a modelagem conceitual dos fenômenos do "mundo real" pela teoria geomorfológica; ii) a representação dos objetos em conceitos computadorizados; iii) o nível da base de dados, os procedimentos de visualização e a posterior aplicação.

Com a utilização crescente de modelos digitais do terreno (MDTs), muitos mapas geomorfológicos "tradicionais" passaram a ser utilizados para validar formas de relevo derivadas em ambiente digital. Nessa perspectiva, o conhecimento heurístico 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).

Evans *et al.* (2009) listam as principais aplicações de MDTs no campo da geomorfologia no século XXI em quatro agrupamentos: i) interpretação visual de MDTs, com a identificação e delimitação manual de feições geomorfológicas; ii) identificação e quantificação automatizada de propriedades geomorfológicas, a partir da extração e utilização de atributos topográficos (declividade, aspecto, curvaturas) para a análise geomorfológica; iii) extração automatizada de estruturas hidrológicas/denudacionais, como a extração de redes de drenagem, talvegues e divisores de água e reconhecimento de padrões de drenagem; iv) extração automatizada de formas de relevo utilizando algoritmos semiautomatizados ou automatizados.

Bishop *et al.* (2012) afirmam que as tecnologias geoespaciais podem facilitar os testes de importantes questões teóricas e conceituais envolvendo morfogênese, morfologia, morfocronologia, domínio de processos e os sistemas dinâmicos de

evolução da paisagem. Entretanto, também apontam alguns problemas relacionados, como conceituação do relevo, escala, equifinalidade, homogeneidade e heterogeneidade, classificação, evolução poligenética e o tópico de maior dificuldade que se refere à ontologia das formas de relevo.

Essa preocupação com a essência das formas de relevo, relacionada ao campo filosófico da ontologia, foi discutida por Smith e Mark (2003). Posteriormente, Mark e Smith (2004) aprofundaram a discussão ontológica das formas de relevo realizando uma discussão sobre os problemas de delimitação, desde uma perspectiva visual até a representação computacional. Os autores destacaram a imprecisão em áreas de transição de unidades ou feições conceituadas com nomenclaturas específicas.

Dehn *et al.* (2001), discutindo sobre os princípios da modelagem semântica de aspectos geomorfológicos, citaram que as formas de relevo são descritas principalmente sob duas perspectivas: considerando unicamente sua geometria ou contemplando as semânticas usadas para expressar e capturar modelos conceituais mentais subjetivos. Nessa perspectiva, Deng (2007) apresentou importante contribuição em artigo que trouxe uma análise ontológica e metodológica do progresso recente de mapeamento digital, enfatizando as etapas de definição, representação e classificação das formas de relevo. O trabalho se ateu às variáveis de maior utilização na geomorfometria (discutidas na seção 2.1): elevação, forma da superfície, posição topográfica, contexto topográfico, escala espacial e objeto das formas de relevo.

Para Evans (2012), cada estudo geomorfológico deve indicar especificamente as definições empregadas para o mapeamento de formas de relevo. Termos como “pequeno”, “curto” e “fraco” são utilizados de modo relativo, não absoluto. Em função dessa problemática, as definições operacionais são necessárias para todas as formas de relevo nas quais a geomorfometria específica (que trata os objetos de modo discreto) é aplicada, pois, conforme o autor, a necessidade por transparência é axiomática.

Sobre a representação de objetos a partir de modelos digitais de elevação, Dragut e Eisank (2011) enfatizaram questões relacionadas à delimitação, classificação e regionalização como função de escala. E, considerando que a representação das formas de relevo apresenta dificuldades quanto a sua concepção e conceituação teórica e técnica (RODRIGUES, 2010), a modelagem digital pode

ocasionar mudanças nos métodos de mapeamentos, já que, conforme Otto *et al.* (2011), historicamente o que diferencia mapas geomorfológicos de outros mapas temáticos é que a informação qualitativa prevalece sobre dados quantitativos ou classificados.

Segundo Bishop *et al.* (2012), a análise orientada a objeto pode ser uma solução para o mapeamento de distintas feições geomorfológicas. Nesse processo, inicialmente é necessário realizar a segmentação com base em critérios específicos para a determinação de entidades espaciais denominadas de objetos. Essa etapa de segmentação é comumente realizada a partir de imagens ou modelos digitais do terreno, podendo ser realizada a partir de diversas abordagens, como análise de homogeneidade, reconhecimento de padrões e atribuição de regras classificatórias. A análise orientada a objeto envolve a computação dos atributos de determinado objeto, como sua localização, tamanho, formas e também suas relações contextuais, como distância e direção em relação aos demais objetos dispostos na paisagem (BISHOP *et al.*, 2012).

Numa perspectiva de mapeamento manual a partir da interpretação visual de modelos digitais, Smith e Clark (2005) analisaram técnicas como relevo sombreado, contraste local e gradiente de declividade, comparando-as com as formas de relevo presentes em um mapa geomorfológico de detalhe em Cabobó do Norte. Os autores concluíram que apenas um método de visualização não possibilita o mapeamento completo e imparcial. Já Mitasova *et al.* (2012) enfatizaram a visualização de formas de relevo a partir de modelos digitais de detalhe (LiDAR), numa perspectiva multitemporal com utilização de imagens em duas e três dimensões para avaliar, monitorar e simular as mudanças do relevo. Asselen e Seijmonsbergen (2006), por sua vez, realizaram um mapeamento geomorfológico semiautomatizado com base em dados Laser (LiDAR). Aplicações específicas são apresentadas na seção 2.1.2.

Em relação às legendas e representações de mapas geomorfológicos, muitas proposições foram estabelecidas tendo como referência as possibilidades de tratamento dos dados em ambiente digital. Mentlík *et al.* (2006), na República Tcheca, apoiando-se no conceito dos sistemas de informações geomorfológicas, propuseram uma estrutura de base de dados dividida em três partes: i) camadas adotadas (hidrologia, geologia, topografia e outros); ii) camadas básicas (como formas elementares, modelo digital de elevação e atributos derivados, materiais de documentação, grupos genéticos de formas de relevo e fenômenos

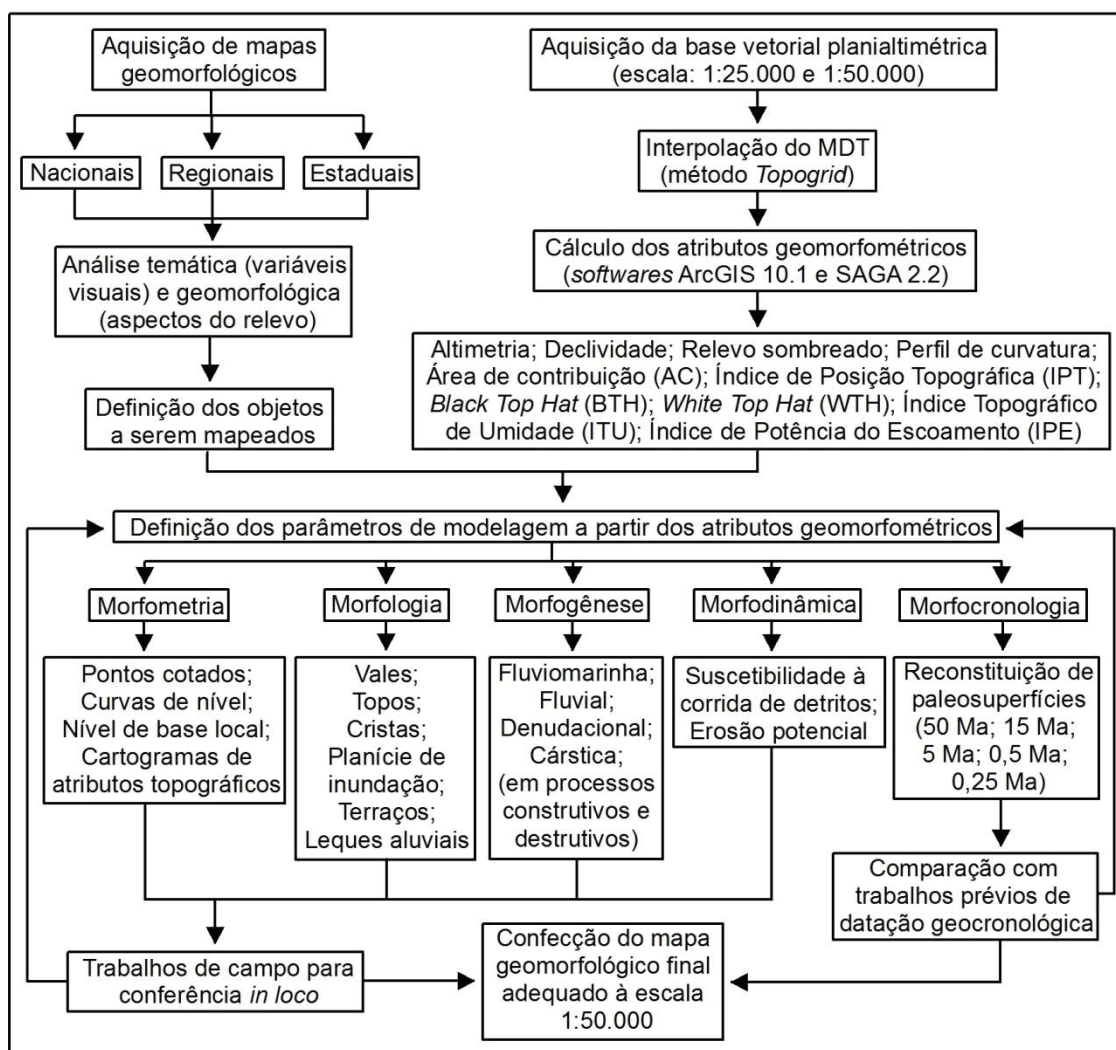
morfodinâmicos); iii) camadas especiais (como análise morfoestrutural e análise geomorfológica abrangente). A proposta considerou tanto os conceitos tradicionais de mapeamento geomorfológico quanto os mais recentes. E, além disso, conforme os autores, um sistema de informação geomorfológica é um tipo especial de sistema de informação geográfica por coletar, armazenar e analisar informação geomórfica como ferramenta para a análise geomorfológica num contexto mais amplo.

Otto e Smith (2011) desenvolveram um sistema que pode ser aplicado como base para SIGs, cuja legenda combina símbolos para hidrografia, morfometria/morfografia, litologia e estrutura com variações de cores para processos/gêneses e idade geológica, armazenados num banco de dados digital. Conforme a proposta, ao combinar aspectos de diferentes sistemas e técnicas de mapeamento clássico, novas possibilidades de apresentação e armazenamento são desenvolvidas, configurando-se como importante ferramenta científica. Outra aplicação recente de destaque é o mapa geomorfológico digital da Polônia, que representou formas endogenéticas, denudacionais, glaciais, fluviais, cársticas, eólicas, marinhas e lagunares, biogênicas e antropogênicas, totalizando 134 símbolos para o mapa na escala 1:100.000 e 91 símbolos na escala 1:500.000.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

A elaboração da proposta metodológica para mapeamento geomorfológico contemplou cinco etapas principais (FIGURA 4): i) aquisição, análise e interpretação de mapas geomorfológicos de distintas escalas, datas e países, sob a perspectiva temática e geomorfológica (seção 3.1); ii) aquisição e correção da base de dados para obtenção do modelo digital do terreno e atributos geomorfométricos derivados no estado do Paraná (seção 3.2 e 3.3); iii) criação das regras de classificação parametrizada, para cada objeto de cada aspecto geomorfológico (morfometria, morfografia, morfogênese, morfodinâmica e morfocronologia), utilizando apenas atributos geomorfométricos (seção 3.4); iv) etapas de controle de campo (seção 3.5), validação e interpretação dos resultados obtidos; v) composição da legenda.

FIGURA 4 - FLUXOGRAMA METODOLÓGICO



FONTE: o autor (2019)

3.1 ANÁLISE DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS

A etapa inicial de análise objetivou estabelecer um panorama da construção de mapas geomorfológicos sob suas diversas variáveis constituintes, sejam geomórficas ou ligadas à cartografia temática, com produtos de distintas datas, países, escalas e recortes (conforme disponibilidade de mapas encontrados em periódicos científicos, referências de livros ou de projetos específicos). Posteriormente, os resultados dessa análise subsidiaram a elaboração do mapeamento geomorfológico a partir da adoção dos objetos a serem identificados e do modo de representação desses mesmos objetos.

Para a avaliação categorizada de mapas geomorfológicos foram adotados três níveis de seleção: i) mapeamentos nacionais, majoritariamente derivados de projetos governamentais, que contemplam legenda padronizada e articulação sistemática; ii) mapeamentos regionais, resultantes de projetos e/ou estudos específicos, individualizados, que embora possam ter vinculação nacional não compreendem toda sua extensão; iii) mapeamentos estaduais, com a inclusão das unidades federativas do Brasil que dispõem de cartografia geomorfológica sistematizada. A abrangência do conjunto de mapas selecionados é indicada pela FIGURA 5, com a representação dos países contemplados pela análise.

Destaca-se que nesta etapa foram selecionados documentos estritamente intitulados de mapas geomorfológicos ou cartas geomorfológicas. Produtos cartográficos denominados de mapas morfológicos, fisiográficos, mapas de unidades de relevo, unidades de paisagem e afins, mesmo contendo os elementos básicos de um mapa geomorfológico, foram desconsiderados.

Para todos os mapas selecionados, os critérios de análise seguiram duas abordagens: geomorfológica e de cartografia temática. Na primeira, buscou-se avaliar se os mapas contêm representados os cinco atributos básicos do relevo: morfometria, morfografia, morfogênese, morfodinâmica e morfocronologia, conforme diretrizes para a cartografia geomorfológica discutidas desde o final da década de 1950 (KLIMASZEWSKI, 1982; FLORENZANO, 2008; COLTRINARI, 2011; VERSTAPPEN, 2011). Na segunda, foram analisadas as variáveis visuais utilizadas, conforme proposta de Bertin (1967), ilustrada pela FIGURA 6, na representação gráfica de cada um dos cinco atributos do relevo. Por fim, os resultados da análise foram tabelados e quantificados.

FIGURA 5 - ABRANGÊNCIA DOS MAPAS GEOMORFOLÓGICOS ANALISADOS



FONTE: o autor (2019)

FIGURA 6 - VARIÁVEIS VISUAIS E SEUS MODOS DE IMPLANTAÇÃO

Variáveis visuais	Propriedades			Modos de implantação						
				Ponto	Linha	Área				
Tamanho	Q	○	≠	●	●	●	●	●	●	●
Intensidade (valor)		○	≠	○	○	○	—	—	—	—
Granulação		○	≠	≡	▨	▨	▨	▨	▨	▨
Cor			≠	≡	●	●	●	—	—	—
Orientação			≠	≡		▨	—	▨	▨	▨
Forma			≠	≡	■	●	▲	—	—	—

Q Quantitativa ○ Ordenada ≠ Seletiva ≡ Associativa

FONTE: adaptado de Cardoso (1984)

3.2 PROCESSAMENTO DO MODELO DIGITAL DO TERRENO

Para a elaboração do Modelo Digital do Terreno foram utilizadas as bases vetoriais planialtimétricas derivadas de cartas topográficas produzidas pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército (DSG) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) nas escalas 1:25.000 e 1:50.000, contendo curvas de nível, pontos cotados e hidrografia. As 86 cartas na escala 1:25.000 compreendem a porção leste do estado do Paraná (Planície Litorânea, Serra do Mar e parte do Primeiro Planalto) e são oriundas do Programa Proteção da Floresta Atlântica (PRÓ-ATLÂNTICA). As demais porções do estado contam com 297 cartas na escala 1:50.000, cuja sistematização vetorial foi realizada pelo Instituto das Águas do Paraná. Após compilação, os arquivos vetoriais passaram por extensa correção dos valores altimétricos e de erros topológicos.

O método empregado para a obtenção do MDT foi o interpolador *Topogrid*, conforme proposta de Hutchinson (1989) adaptada pelo *software* ArcGIS a partir da versão 9 (ferramenta "*Topo to raster*"), cujo modelo matricial resultante possui grade regular e enfatiza a consistência hidrológica. Como dados de entrada foram inseridos os valores altimétricos pontuais e lineares, com 345860 pontos cotados, 241179 segmentos contínuos de curvas de nível (com extensão total de 1705271 quilômetros) e 953260 segmentos de hidrografia (com extensão total de 423083 quilômetros), cuja geometria confere feições escavadas no modelo resultante — com o algoritmo *enforcement* aplicado na drenagem.

A importante etapa de definição do tamanho da célula (*pixel*) do MDT *Topogrid* foi amparada pelas contribuições de Hengl (2006), utilizando-se de duas abordagens discutidas pelo autor: a primeira num viés cartográfico da escala da base de dados e a segunda numa perspectiva das características geomorfológicas locais.

A proposta cartográfica para a estimativa do tamanho de célula adequado para o MDT considera o conceito de "delineação mínima legível" (DML) e "acurácia máxima local" (AML), segundo Vink (1975). Ambas são definidas em função da menor área a ser mapeada. A DML é referenciada como 2,5mm de largura (6,25mm²), no mapa, e resulta em resoluções grosseiras. Já a AML indica os valores mínimos, que variam de 0,25mm a 0,1mm de largura, resultando em resoluções mais finas. Como valor intermediário, Hengl (2006) recomenda a utilização de

0,5mm, medido no mapa, como referência. A partir desses parâmetros, o tamanho de célula é determinado numa relação entre a menor largura mapeável e a escala dos dados planialtimétricos, conforme equação 1.

$$C = FE \cdot 0,0005 \quad (\text{equação 1})$$

Onde C é o tamanho da célula, em metros, FE é o fator de escala da base de dados e o valor numérico, já convertido em metros, se refere à menor largura discernível medida no mapa (na equação, como exemplo, consta 0,5mm).

Tendo como referência a escala 1:50.000, os tamanhos de célula indicados foram: 125 metros (DML), 12,5 a 0,5 metros (AML) e 25 metros (recomendação intermediária).

A segunda proposta para a determinação do tamanho adequado de célula é estabelecida pela relação entre área (medida real) e densidade das curvas de nível, representada pela equação 2. Dessa forma, quanto maior a complexidade geomorfológica, menor será o tamanho indicado da célula.

$$C = \frac{A}{2 \cdot \sum l} \quad (\text{equação 2})$$

Onde C é o tamanho da célula, A é a área total e $\sum l$ é o somatório do comprimento das curvas de nível, com todas as variáveis em metros.

De modo complementar, a fim de estipular um valor mínimo que contemple as maiores variações do relevo, Hengl (2006) sugere a aplicação da mesma equação para os 5% da área total com maior densidade de curvas de nível.

Após a aplicação dessa equação para todo o estado do Paraná, o tamanho de célula indicado foi de 58 metros. Na região da Serra do Mar, porção do estado com maior concentração de curvas de nível, o tamanho recomendado foi de 13 metros.

Por fim, considerando os valores obtidos pela aplicação dessas duas propostas (cartográfica e geomorfológica), optou-se por uma célula de 20 metros para o MDT interpolado pelo método *Topogrid*. A matriz final contabilizou uma grade de 33193 x 23232 células.

3.3 CÁLCULO DOS ATRIBUTOS GEOMORFOMÉTRICOS

A partir do MDT foram calculados dez atributos geomorfométricos derivados (TABELA 2), de primeira e segunda ordem (WILSON; GALLANT, 2000), locais e regionais (OLAYA, 2009), que serviram como base para a construção do mapa geomorfológico apoiado na combinação de parâmetros quantitativos.

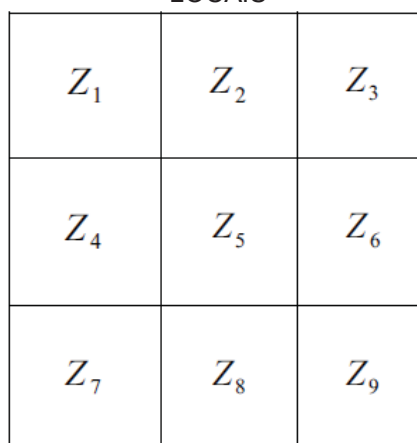
TABELA 2 - ATRIBUTOS GEOMORFOMÉTRICOS CALCULADOS

Atributo geomorfométrico	Ordem / Cálculo
Altimetria	Zero (MDT) / Regional
Declividade	Primário / Local
Relevo sombreado	Primário / Local
Perfil de curvatura	Primário / Local
Área de contribuição (AC)	Primário / Regional
Índice de Posição Topográfica (IPT)	Primário / Regional
<i>Black Top Hat (BTH)</i>	Primário / Regional
<i>White Top Hat (WTH)</i>	Primário / Regional
Índice Topográfico de Umidade (ITU)	Secundário / Composto
Índice de Potência do Escoamento (IPE)	Secundário / Composto

FONTE: o autor (2019)

Os atributos geomorfométricos primários, derivados diretos do MDT, foram computados a partir de uma janela móvel 3x3 células (local), cujos algoritmos contemplam a análise da célula central em relação às oito do seu entorno (FIGURA 7).

FIGURA 7 - JANELA MÓVEL 3x3 PARA CÁLCULO DE ATRIBUTOS GEOMORFOMÉTRICOS LOCAIS



FONTE: Silveira e Silveira (2014)

A declividade (ferramenta *slope*), que mensura a inclinação da superfície, e o relevo sombreado (ferramenta *hillshade*), que representa a iluminação hipotética de uma superfície, foram calculados a partir das variáveis direcionais de Horn (1981). Para o declive, utilizou-se os parâmetros das equações 3 e 4, implementadas no *software* ArcGIS versão 10.1.

$$f_x = \frac{[(Z_3 + 2Z_6 + Z_9) - (Z_1 + 2Z_4 + Z_7)]}{8L} \quad (\text{equação 3})$$

$$f_y = \frac{[(Z_1 + 2Z_2 + Z_3) - (Z_7 + 2Z_8 + Z_9)]}{8L} \quad (\text{equação 4})$$

Onde f_x é o gradiente leste-oeste da janela 3x3, f_y é o gradiente norte-sul e L é o espaçamento da grade regular (no presente trabalho, 20 metros).

A partir desses valores, a declividade em porcentagem foi calculada de acordo com a equação 5.

$$\text{Declividade em porcentagem} = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (\text{equação 5})$$

Já o perfil de curvatura (também conceituado na literatura como curvatura horizontal ou curvatura longitudinal) foi calculado igualmente a partir de vizinhança local 3x3 células (ferramenta *curvature*), mas conforme variáveis direcionais de Zevenbergen e Thorne (1987), expressas desde a equação 6 até 15, em que I é igual à célula central (Z_5 , na FIGURA 7) e que L é o tamanho da célula do MDT (20 metros).

$$Z = Ax^2y^2 + Bx^2y + Cxy^2 + Dx^2 + Ey^2 + Fxy + Gx + Hy + I \quad (\text{equação 6})$$

Onde cada variável é calculada por:

$$A = \frac{\left[\frac{(Z_1 + Z_3 + Z_7 + Z_9)}{4} - \frac{(Z_2 + Z_4 + Z_6 + Z_8)}{2} + Z_5 \right]}{L^4} \quad (\text{equação 7})$$

$$B = \frac{\left[\frac{(Z_1 + Z_3 - Z_7 - Z_9)}{4} - \frac{(Z_2 - Z_8)}{2} \right]}{L^3} \quad (\text{equação 8})$$

$$C = \frac{\left[\frac{(-Z_1 + Z_3 - Z_7 + Z_9)}{4} - \frac{(Z_4 - Z_6)}{2} \right]}{L^3} \quad (\text{equação 9})$$

$$D = \frac{\left[\frac{(Z_4 + Z_6)}{2} - Z_5 \right]}{L^2} \quad (\text{equação 10})$$

$$E = \frac{\left[\frac{(Z_2 + Z_8)}{2} - Z_5 \right]}{L^2} \quad (\text{equação 11})$$

$$F = \frac{(-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9)}{4L^2} \quad (\text{equação 12})$$

$$G = \frac{(-Z_4 + Z_6)}{2L} \quad (\text{equação 13})$$

$$H = \frac{(Z_2 - Z_8)}{2L} \quad (\text{equação 14})$$

Com base nesse polinômio, o perfil de curvatura é calculado conforme equação 15.

$$\text{Perfil de curvatura} = -2 \left(\frac{G^2 D - GHF + H^2 E}{G^2 + H^2} \right) \quad (\text{equação 15})$$

A área de contribuição (AC), por sua vez, foi quantificada pelo método proposto por Tarboton (1997), com o algoritmo *D-Infinity* processado pelo *software* SAGA versão 2.2.2 (ferramenta *Flow Accumulation*). Nesse método, inicialmente é determinado o ângulo de direção do fluxo (anti-horário a partir do leste) como a direção mais íngreme considerando as oito facetas triangulares formadas em uma janela 3x3 células (FIGURA 8), diferindo do algoritmo *D-8* por considerar a proporção de fluxo para cada célula.

Após indicação das direções, o fluxo acumulado é quantificado pela soma das células à montante, ou seja, pela contribuição acumulada do entorno mais

elevado. Considera-se, portanto, que o fluxo de cada uma das células drena para algum de seus vizinhos, tendo esse valor somado ao seu.

Por fim, a área de contribuição é obtida pela multiplicação da área de cada célula do MDT (neste caso, 400 m²) pelo valor do fluxo acumulado (FIGURA 8).

FIGURA 8 - MÉTODO D-INFINITO PARA DETERMINAÇÃO DA ÁREA DE CONTRIBUIÇÃO

MDT (Altimetria) (célula 20m x 20m)					Direção de fluxo (D-Infinito)					Fluxo acumulado (proporção de células)					Área de contribuição (m ²)				
334	332	329	326	322	5.5	5.5	5.4	5.3	5.2	1	1	1	1	1	400	400	400	400	400
333	329	324	320	316	5.9	5.8	5.5	5.5	5.2	1	2.5	3.1	2.2	2.1	400	1007	1221	861	851
332	328	321	315	310	6.1	6.1	5.7	5.5	5.3	1	2.3	4.2	5.4	4	400	914	1693	2164	1589
331	327	320	311	304	6.3	6.3	6.2	6	5.7	1	2.2	3.7	7.2	12.2	400	863	1492	2861	4886
331	327	319	310	302	0	0	0	0	0	1	2	3.1	4.6	7.9	400	815	1247	1828	3176

FONTE: o autor (2019)

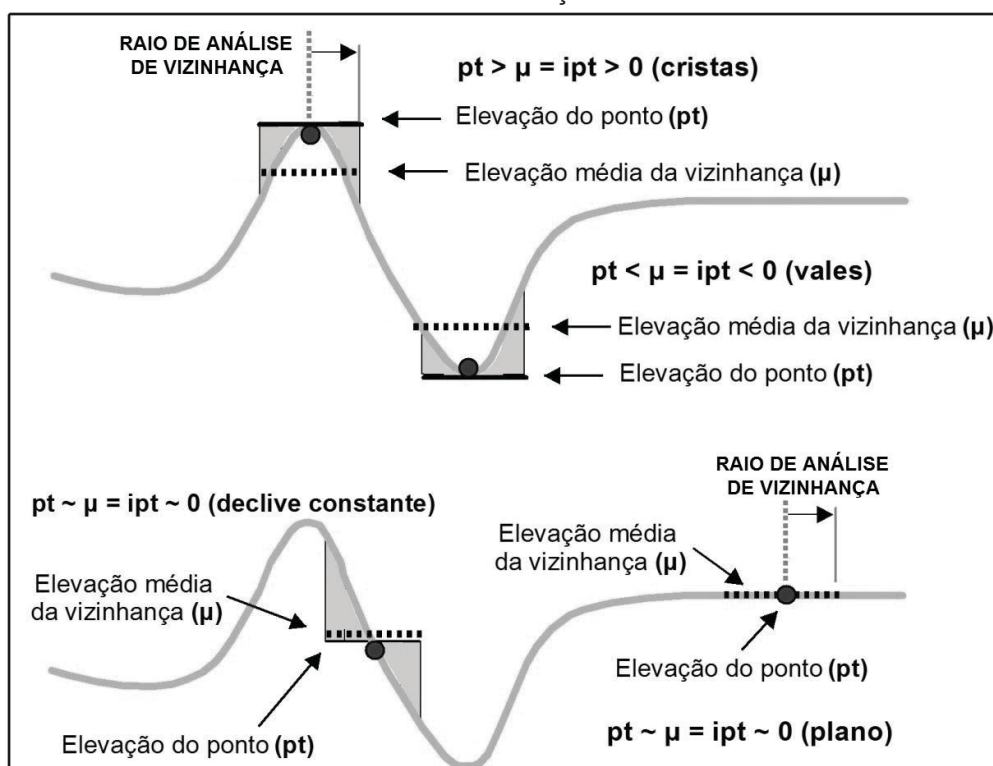
Outro atributo geomorfométrico calculado foi o Índice de Posição Topográfica (IPT), conforme proposta de Weiss (2001), cujo cálculo baseia-se na denominada "Diferença da Elevação Média" de Wilson e Gallant (2000, p. 74).

O IPT mensura a diferença entre o valor altimétrico de uma célula central (Z_0) e a média da altimetria da sua vizinhança a partir de um raio ou janela móvel predeterminada (\bar{Z}), consoante à equação 16 e ilustrado pela FIGURA 9. Operacionalmente, no *software* ArcGIS, o cálculo da média foi efetuado pela ferramenta *Focal Statistics* e, na sequência, subtraído pelo MDT com a ferramenta *Raster Calculator*.

$$IPT = Z_0 - \bar{Z} \quad (\text{equação 16})$$

Valores positivos indicam que a célula situa-se mais elevada que o entorno, valores negativos representam células mais rebaixadas e valores próximos a zero indicam células com declive constante. Entretanto, destaca-se que esse atributo é dependente do fator de escala e, portanto, os valores resultantes devem ser interpretados a partir do tamanho de raio ou janela móvel adotada para o cálculo da altimetria média.

FIGURA 9 - ÍNDICE DE POSIÇÃO TOPOGRÁFICA



FONTE: adaptado de Weiss (2001) e Silveira e Silveira (2016a)

Já o atributo geomorfométrico derivado do método da transformação *Top Hat* também considerou a análise de vizinhança regional a partir do MDT para sua obtenção. Essa função, aplicada de modo pioneiro à análise digital do relevo por Rodriguez *et al.* (2002), pode ser dividida em duas: i) *Black Top Hat* (BTH), com uma função de abertura, que mensura a altimetria mínima da altimetria máxima; ii) *White Top Hat* (WTH), com uma função de fechamento, que mensura a altimetria máxima da altimetria mínima, ambas a partir de um raio ou janela móvel predefinida, conforme ilustra a FIGURA 10A. Assim como o IPT, a função *Top Hat* também é afetada diretamente pelo fator de escala.

Ao subtrair os valores do BTH ($Z_{mínmax}$) pelo MDT (Z_0 , célula a célula) se obtém a extração dos vales (equação 17), e ao subtrair o MDT pelo WTH ($Z_{máxmín}$) se obtém a extração dos topos (equação 18), de acordo com a FIGURA 10B. Para ambos ainda é possível definir um valor limiar de corte a fim de eliminar artefatos residuais ou destacar apenas os principais vales e topos, como aponta o último passo da FIGURA 10C.

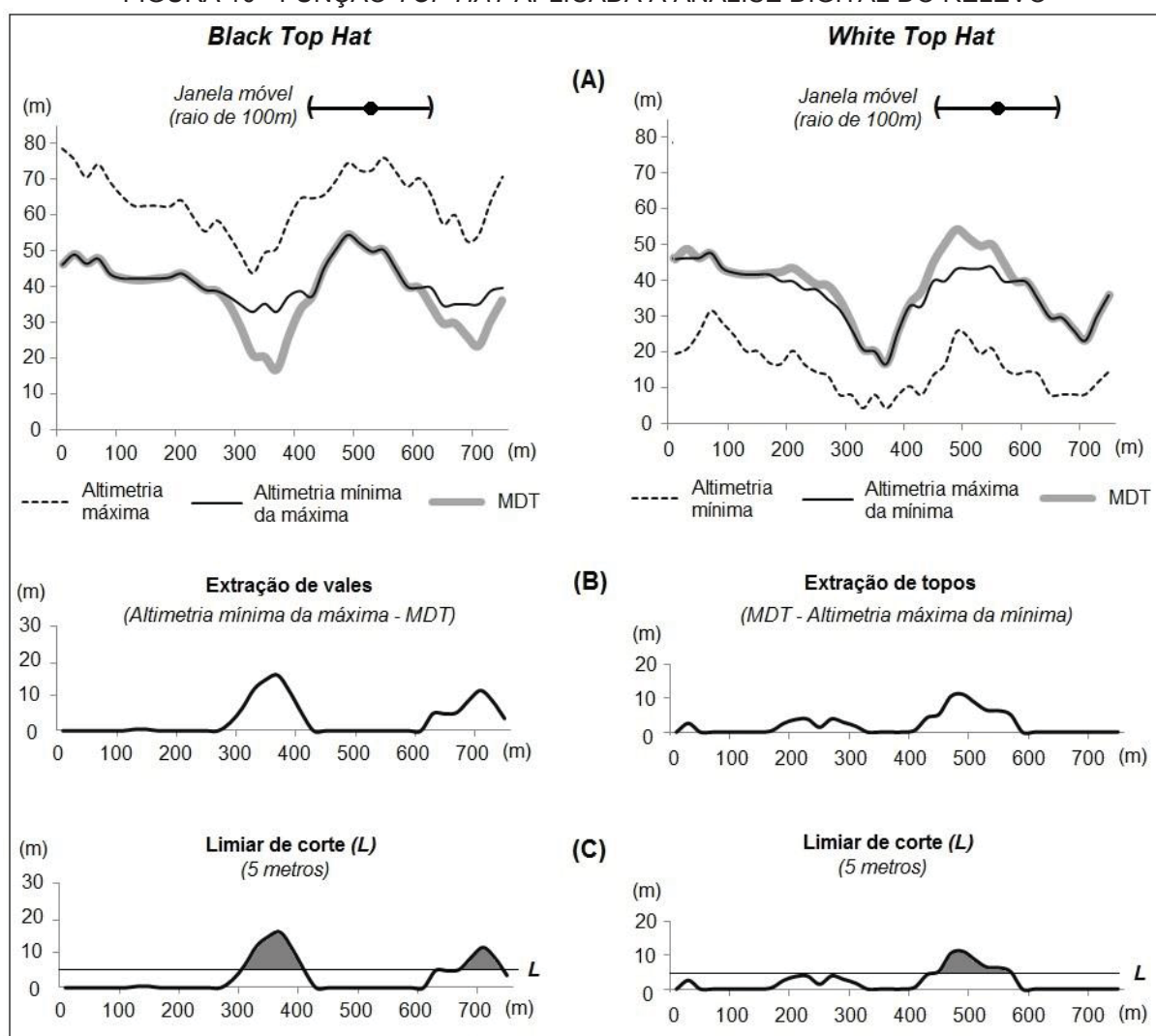
$$\text{Vales (BTH)} = Z_{mínmax} - Z_0 \quad (\text{equação 17})$$

$$\text{Topos (WTH)} = Z_0 - Z_{\text{máx}mín} \quad (\text{equação 18})$$

Assim como para o IPT, o cálculo das altimetrias mínimas e máximas se deu a partir da ferramenta *Focal Statistics* e as subtrações com o MDT foram realizadas pela ferramenta *Raster Calculator*.

O método *Top Hat* é similar aos mapas de *seppômen* (níveis de cimeira) e *sekkokumen* (níveis de base), conforme técnicas desenvolvidas desde a década de 1950 por pesquisadores japoneses (HUZITA; KASAMA, 1977). Entretanto, enquanto os mapas de *seppômen* e *sekkokumen* consideram os valores máximos e mínimos, respectivamente, a partir de janelas fixas, a proposta do *Top Hat* contempla janelas móveis onde o cálculo é feito célula a célula do MDT.

FIGURA 10 - FUNÇÃO TOP HAT APLICADA À ANÁLISE DIGITAL DO RELEVO



FONTE: o autor (2019)

Destaca-se que para evitar a escolha arbitrária e subjetiva do tamanho das janelas móveis para cálculo dos atributos geomorfométricos regionais IPT e *Top Hat*, utilizou-se como referência duas classificações taxonômicas que atribuem valores aproximados de área para feições geomorfológicas adequadas à determinada ordem de grandeza espacial e temporal: a taxonomia de Tricart (1965), representada pela FIGURA 11, e a taxonomia de Dikau (1989), ilustrado pela FIGURA 12. Em ambas as figuras constam, em vermelho, o intervalo taxonômico pretendido para o mapeamento realizado neste trabalho.

FIGURA 11 - CLASSIFICAÇÃO TAXONÔMICA DOS FATOS GEOMORFOLÓGICO DE TRICART

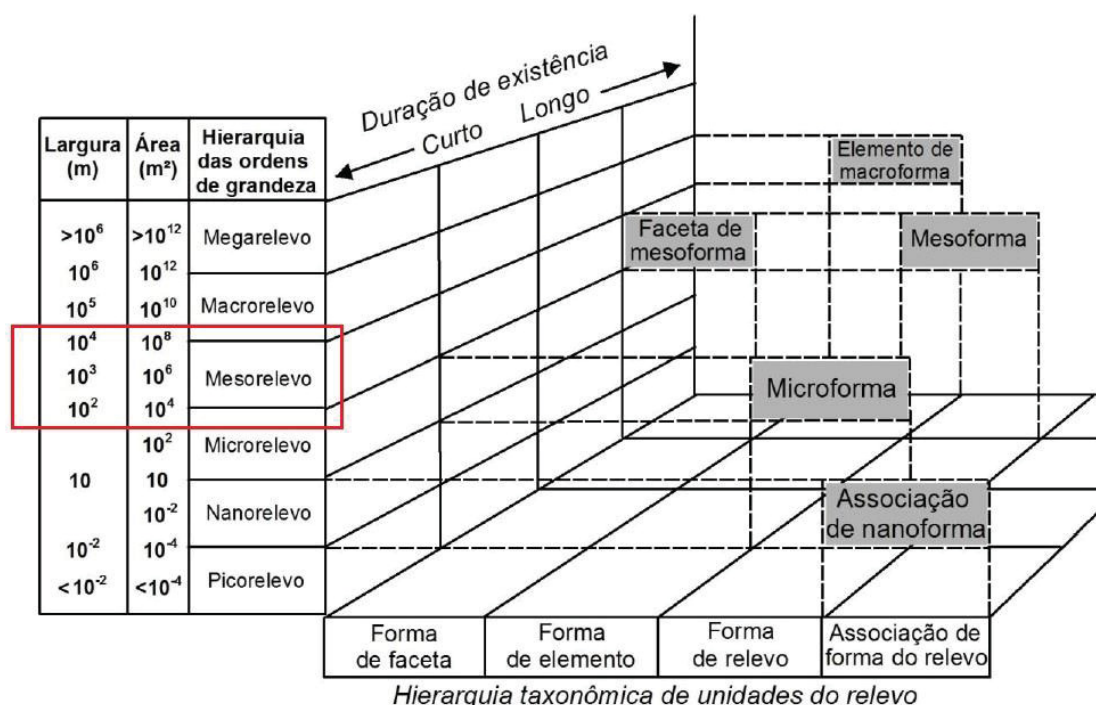
Ordem	Unidade de superfície em km ²	Características das unidades e exemplos	Unidades climáticas correspondentes	Mecanismos genéticos comandando o relevo	Ordem de grandeza de permanência temporal
I	10 ⁷	Continentes, bacias oceânicas	Grandes conjuntos zonais, comandados por fatores astronômicos	Diferenciação da crosta terrestre, SIAL e SIMA	10 ⁹ anos
II	10 ⁶	Grandes conjuntos estruturais	Grandes tipos de clima (interferência de influências geográficas com fatores astronômicos)	Movimento da crosta terrestre como a formação dos geosinclinais. Influências climáticas sobre a dissecação	10 ⁸ anos
III	10 ⁴	Grandes unidades estruturais	Nuances em tipos de climas, mas sem grande importância para a dissecação	Unidades tectônicas ligadas à Paleogeografia. Velocidade da dissecação influenciada pela litologia	10 ⁷ anos
IV	10	Unidades tectônicas elementares (maciços montanhosos, <i>horsts</i> , fossas etc.)	Climas regionais de influência geográfica sobretudo nas regiões montanhosas	Influência predominante da tectônica, secundária da litologia	
<i>Soleira de Compensação Isostática</i>					
V	10	Acidentes tectônicos (anticlinas, sinclinal, <i>mont</i> etc.)	Climas locais influenciados pela disposição do relevo	Predominância da litologia e tectostática. Influências estruturais clássicas	10 ⁷ anos a 10 ⁶ anos
VI	10 ⁻²	Formas de relevo (crista, terraço, moraina, cone de dejeção etc.)	Mesoclima diretamente ligado a forma	Predominância do fator morfodinâmico influenciado pela litologia	10 ⁴ anos
VII	10 ⁻⁶	Microformas (lentes de solifluxão, solos poligonais, ravinas etc.)	Microclima diretamente ligado à forma por autocatalise	Microclima diretamente ligado à forma por autocatalise (ex.: lapíás)	10 ² anos
VII	10 ⁻⁸	Feições microscópicas (detalhe de corrosão, de polimento etc.)	Microambiente	Influência da dinâmica e da textura da rocha	

Fonte: adaptado de Tricart (1965)

Com base nesses intervalos, foram adotados três tamanhos de raios de referência para os cálculos de vizinhança: i) detalhada, com raio de 100m

(equivalente a uma janela de 200m x 200m), que representa a ordem VI na taxonomia de Tricart (op cit.) e a transição de microrelevo para mesorelevo na taxonomia de Dikau (op cit.); ii) intermediária, com raio de 500m (equivalente a uma janela de 1 km x 1 km), que representa a transição da ordem V para VI na taxonomia de Tricart e mesorelevo na taxonomia de Dikau; iii) generalizada, com raio de 5 km (equivalente a uma janela de 10 km x 10 km), que representa a ordem IV na taxonomia de Tricart e a transição de mesorelevo para macrorelevo na taxonomia de Dikau.

FIGURA 12 - HIERARQUIA TAXONÔMICA DE DIKAU



Fonte: adaptado de Dikau (1989)

Quanto aos atributos geomorfométricos secundários, foram calculados o Índice Topográfico de Umidade (ITU), segundo Beven e Kirkby (1979) e Quinn *et al.* (1991), e o Índice de Potência do Escoamento² (IPE), conforme Moore *et al.* (1988).

O ITU é composto pela área de contribuição dividida pela tangente da declividade (equação 19) e é um parâmetro utilizado para descrever a tendência de acumulação de água para cada célula do MDT. Já o IPE é calculado pela

² Denominado, originalmente, como "Stream Power Index".

multiplicação entre a área de contribuição e a tangente da declividade (equação 20) e pode ser utilizado para mensurar a erosão potencial do fluxo.

$$ITU = \ln\left(\frac{A_c}{\tan\beta}\right) \quad (\text{equação 19})$$

$$IPE = A_c \cdot \tan\beta \quad (\text{equação 20})$$

Onde \ln é o logaritmo natural, A_c é a área de contribuição e $\tan\beta$ é a tangente da declividade mensurada em graus.

3.4 PARÂMETROS DE CLASSIFICAÇÃO GEOMORFOMÉTRICA

A construção do mapa geomorfológico amparado unicamente por parâmetros quantitativos foi realizada com base na discretização e combinação dos atributos geomorfológicos pelo método de álgebra de mapas (TOMLIN, 1990). Essa etapa marca a transição da geomorfometria geral, com o tratamento de dados contínuos, 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.

Como conceito norteador utilizou-se a proposta de "assinatura geométrica", de Pike (1988), que caracteriza um conjunto de mensurações topográficas capazes de identificar e descrever, sem ambiguidade, um objeto ou um conjunto de objetos em díspares paisagens geomorfológicas. Também foram considerados os pressupostos de Minár e Evans (2008), em que a segmentação da superfície terrestre deve maximizar tanto a homogeneidade interna quanto as diferenças externas dos objetos.

Inicialmente foram definidos os objetos a serem mapeados para cada aspecto geomorfológico elementar: morfogênese, morfocronologia, morfografia, morfometria e morfodinâmica. Esse levantamento se deu a partir da análise representativa de mapas geomorfológicos (seção 3.1), com a adoção de classes de interesse, e também pelo conhecimento prévio da área de estudo e trabalhos de campo pontuais.

A segunda etapa, de modelagem, consistiu no estabelecimento dos parâmetros geomorfométricos para representar cada objeto geomorfológico de modo padronizado para todo o estado do Paraná. Nessa fase de caracterização quantitativa de feições e processos definidos qualitativamente foram adotadas algumas regras de classificação embasadas em métodos preexistentes, com adaptações de valores e inclusão de variáveis adicionais. Entretanto, a maioria das classes e parâmetros foram criados de modo específico (orientados ao objeto), cuja proposição metodológica apresentada confere ineditismo ao trabalho.

Para todas as classificações matriciais obtidas, que compuseram o mapeamento final, foram removidos agrupamentos inferiores a 25 células contíguas (que representam, em área, 10000 m²). O valor definido para filtragem está associado ao nível de generalização adequado à escala pretendida pelo mapeamento. Conforme propostas taxonômicas utilizadas como referência, a área mínima para representação de objetos equivale às formas de relevo (ordem VI) de Tricart (1965) (FIGURA 11) e à transição entre microrelevo e mesorelevo de Dikau (1989) (FIGURA 12).

3.4.1 Morfogênese

A definição das classes morfogenéticas foi baseada na concepção de mapas geomorfológicos poloneses (KLIMASZEWSKI, 1963a; 1963b) e alemães (LESER; STÄBLEIN, 1975), onde 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 do estado do Paraná foram definidas três classes com ocorrência registrada (dentre as quinze principais) para as etapas de modelagem geomorfométrica: morfogênese fluviomarinha, morfogênese fluvial e morfogênese denudacional.

A gênese cárstica do relevo foi incluída de modo associativo, sobreposta às demais classes morfogenéticas, sem atribuição de parâmetros geomorfométricos

para sua delimitação. Devido às especificidades do relevo em subsuperfície, ao invés da modelagem foram utilizadas as unidades do Grupo Açungui (contemplando as formações Votuverava, Itaiacoca e Capiru) do Mapeamento Geológico do Estado do Paraná (MINEROPAR, 2001), para áreas com ocorrência de mármores dolomíticos, metadolomitos e metacalcários. Considerou-se, portanto, apenas o carste associado às rochas carbonáticas, ainda que autores como Sallun Filho e Karmann (2007) e Melo *et al.* (2011) consideram a existência de feições cársticas em rochas areníticas do Segundo Planalto.

Para cada classe morfogenética modelada foi atribuído um processo morfogenético predominante, conforme proposta de Klimaszewski (1963a; 1963b; 1990) utilizada nos primeiros mapas poloneses, cujos processos podem ser construtivos e destrutivos. Nessa perspectiva, um morro, caracterizado como uma unidade de morfogênese denudacional, pode ser segmentado com o predomínio de processo destrutivo no topo e de processo construtivo nas porções intermediárias e inferiores (caracterizando, por exemplo, depósitos coluvionares).

Para a parametrização foram utilizados quatro atributos geomorfométricos: hipsometria, área de contribuição, ITU e IPT, sendo que para esse último foram calculados três distintos raios de análise de vizinhança: 100, 500 e 5000 metros (5, 25 e 250 células, respectivamente). Os parâmetros detalhados são apresentados pela TABELA 3.

TABELA 3 - PARÂMETROS GEOMORFOMÉTRICOS PARA A MODELAGEM DA MORFOGÊNESE

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

FONTE: o autor (2019)

A morfogênese fluviomarinha teve como parâmetro apenas a hipsometria, seguindo contribuição de Angulo (2004), enquanto a morfogênese fluvial contemplou a soma de quatro regras de classificação além do limiar hipsométrico. Cada regra condiz às características de distintos contextos geomorfológicos da área de estudo, devido à variedade morfométrica da ocorrência de feições e processos fluviais.

A morfogênese denudacional, por fim, contemplou todas as demais áreas em que não houve ocorrência de morfogênese fluviomarinha e fluvial. A segmentação, portanto, se deu a partir dos parâmetros inversos dessas duas primeiras classes morfogenéticas.

A segmentação de cada classe da morfogênese em dois processos morfogenéticos (destrutivos e construtivos) foi realizada pelo IPT, declividade e área de contribuição (TABELA 3).

3.4.2 Morfocronologia

Para a indicação da morfocronologia foi adaptada uma metodologia que objetivou reconstituir paleosuperfícies a partir da análise de vizinhança dos valores altimétricos com o atributo geomorfométrico *Black Top Hat* (FIGURA 10), cujo tamanho da janela móvel foi atribuído a partir de uma relação têmporo-espacial estimada (e linear). Os remanescentes preservados na paisagem dessas paleosuperfícies foram modelados pelos atributos IPT e declividade.

Algumas publicações prévias utilizaram o BTH como base para estimativa de taxas de denudação e incisão de vales (RODRÍGUEZ *et al.*, 2002; RIQUELME *et al.*, 2008; LUO *et al.*, 2015), nos quais a escolha da 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), ilustrada pela FIGURA 11, que vincula valores de área ao tempo aproximado de permanência das feições na paisagem.

Considerou-se, portanto, que as maiores elevações residuais num entorno predefinido pela relação têmporo-espacial indicam os níveis de paleosuperfícies e

que essas, por sua vez, quando tangenciadas à superfície atual em porções planas, caracterizam remanescentes ou níveis de antigos terraços.

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, cujos dados estão disponíveis na literatura (SALGADO *et al.*, 2007; RIFFEL, 2012; COUTO, 2015; RIFFEL *et al.*, 2015; RIFFEL *et al.*, 2016).

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 estado do Paraná contempla três pediplanos (Pd₃, Pd₂ e Pd₁) e dois níveis de pedimentos embutidos (P₂ e P₁). Conforme a proposta, 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).

Entretanto, destaca-se que pelo fato das paleosuperfícies serem reconstituídas para todo o estado do Paraná, assumiu-se como modelo conceitual uma perspectiva poligenética para a origem e evolução das superfícies aplanadas (SALGADO, 2007). Utilizou-se, portanto, a referência temporal dos pediplanos e pedimentos, mas a interpretação das paleosuperfícies para a área de estudo em sua totalidade considerou tanto a influência climática quanto estrutural e tectônica. Assim, os pediplanos foram reinterpretados como paleosuperfícies (Ps) e os pedimentos como terraços (T).

Os parâmetros utilizados para os modelos de reconstituição geomorfológica são apresentados pela TABELA 4, que evidencia os critérios para adoção do tamanho de janela móvel para cálculo do BTH a partir do MDT.

Além disso, foi necessário incluir um limiar hipsométrico para a ocorrência de cada paleosuperfície, já que algumas porções do estado, com destaque para o Terceiro Planalto, apresentam extenso processo de denudação sem que hajam feições testemunhas representadas na paisagem, seja por efeito do nível de base ou

por menor homogeneidade litológica em relação às demais regiões do Paraná. Nessa perspectiva, considerou-se que a Ps₃ (50 Ma) não apresenta elevações residuais abaixo da altitude de 800 metros, a Ps₂ (15 Ma) abaixo de 500 metros e a Ps₁ (5 Ma) abaixo de 300 metros. Para as paleosuperfícies mais recentes (500 e 250 mil anos) o limiar hipsométrico excluiu a planície fluviomarina (< 20 m), elaborada posteriormente.

Os remanescentes planos que testemunham morfologicamente a ocorrência e os níveis das paleosuperfícies foram identificados com base na combinação entre o IPT intermediário com raio de 500 metros (25 células), que destacou as porções mais elevadas e com dispersão do fluxo (> 0), e a declividade, que segmentou as porções planas (< 3%). Ao tangenciar o nível de uma paleosuperfície, atribuiu-se sua cronologia estimada para a feição (FIGURA 13A e B).

Além dos remanescentes e terraços, foi acrescentado no mapa geomorfológico a indicação das paleosuperfícies para os topos residuais, conforme ilustra a FIGURA 13C e D. Quando o segmento plano ou os topos são tangenciados por mais de uma paleosuperfície, definiu-se que prevalece a mais antiga (FIGURA 13A, C e D).

TABELA 4 - PARÂMETROS PARA A ELABORAÇÃO DOS MODELOS DE PALEOSUPERFÍCIES

Idade da paleosuperfície poligenética	Superfície de referência (Bigarella <i>et al.</i> , 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

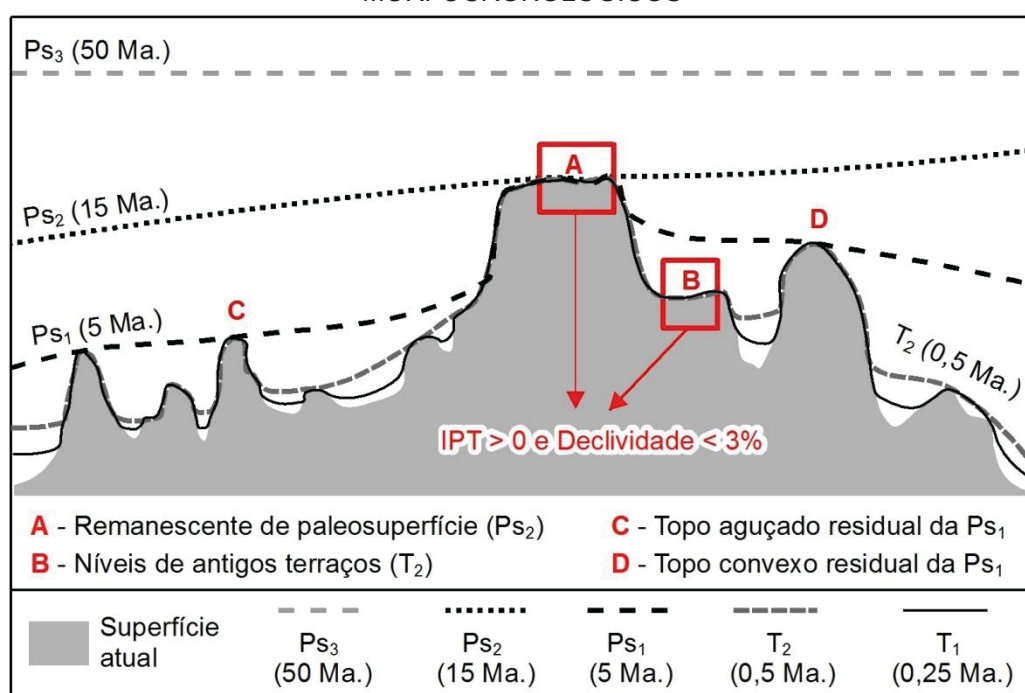
FONTE: o autor (2019)

A avaliação dos modelos obtidos foi realizada a partir da comparação com mensurações e datações amostrais publicadas para porções representativas do estado do Paraná. Em relação aos trabalhos que mensuraram taxas de denudação utilizando nuclídeos cosmogênicos ¹⁰Be coletados em sedimentos aluviais, utilizou-se como referência o trabalho de Couto (2015), 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 MDTs das paleosuperfícies e o MDT 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. O primeiro, de Riffel (2012), com base numa combinação entre os métodos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ por aquecimento gradual a laser e geocronologia (U–Th)/He, datou grãos de oxihidróxidos Mn supergênicos em perfis lateríticos em pontos amostrais na Serra do Mar (Serra do Quiriri) e Primeiro Planalto (Bacia de Curitiba, Vale do Ribeira e Planalto de Castro). O segundo, de Riffel *et al.* (2015), também com base nos métodos $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ e (U–Th)/He, enfatizou as feições ruiformes de Vila Velha e da Serra das Almas, localizadas no Segundo Planalto. O terceiro, de Riffel *et al.* (2016), que contemplou a região dos derrames basálticos em Guarapuava, no Terceiro Planalto, datou grãos de goethita em concreções ferruginosas *in situ* pelo método (U–Th)/He. Por fim, as paleosuperfícies modeladas foram comparadas com esse conjunto de datações estabelecidas.

FIGURA 13 - MODELAGEM DAS PALEOSUPERFÍCIES E INDICADORES MORFOCRONOLÓGICOS



FONTE: o autor (2019)

3.4.3 Morfografia

A representação morfográfica contemplou a modelagem de seis feições, subdivididas conforme características específicas: i) vales (segmentados em vales planos, abertos e fechados), topos (convexos e interfluviais e aguçados), cristas, planícies de inundação (fluviais e fluviomarinhas), terraços (remanescentes de paleosuperfícies e fluviomarinhas) e cones de dejeção (pequenos, intermediários e grandes). Essas feições são representadas de modo majoritário por mapas geomorfológicos de diversos países. Os parâmetros empregados são apresentados pela TABELA 5, na qual se destaca a inclusão de classes da morfogênese como regra de classificação.

Os vales foram definidos como feições lineares cuja ocorrência está condicionada à área de acumulação. Posteriormente, a segmentação morfológica em vales planos, abertos ou fechados se pautou na análise de vizinhança da altimetria (100 metros para cada margem), indicada pelos valores do atributo BTH discretizado conforme valores de desvio padrão. Pressupõe-se que quanto maior o valor do BTH, mais encaixado tende a ser o vale.

Os topos foram mapeados seguindo critérios semelhantes aos dos vales, entretanto com a utilização do atributo WTH que é o cálculo inverso do BTH (FIGURA 10). A caracterização dos topos e linhas de crista foi parametrizada pelos valores de desvio padrão do WTH e condicionada à ocorrência em áreas de morfogênese denudacional com processo morfogenético destrutivo (TABELA 3). Segmentos lineares de crista com extensão inferior a 1 km foram desconsiderados.

As planícies de inundação, fragmentadas pela gênese fluvial e fluviomarinha, foram mapeadas a partir da declividade e BTH, respectivamente. Devido à baixa variação altimétrica na planície fluviomarinha, utilizou-se como critério o limiar de corte de 2 metros do BTH (FIGURA 10C), sendo essa a única vez no trabalho em que foi atribuído um valor determinístico ao invés de critérios estatísticos como média e desvio padrão para os atributos que têm interferência do fator de escala (raio da análise de vizinhança).

Os terraços, por sua vez, foram segmentados em fluviomarinhas e remanescentes de paleosuperfícies. Para os terraços fluviomarinhas, com ocorrência em cotas inferiores a 20 metros, foi utilizado o perfil de curvatura para identificar as rupturas convexas longitudinais (convertidas em feições lineares) que

caracterizam as bordas dos terraços e também pequenas dunas. Já os terraços associados às paleosuperfícies, cujos parâmetros detalhados são apresentados pela TABELA 4 da morfocronologia, foram compreendidos como remanescentes dos últimos 500 mil anos que registram níveis de antigas planícies fluviais de inundação que, atualmente, encontram-se sobrepostas às feições denudacionais de processos destrutivos.

TABELA 5 - PARÂMETROS GEOMORFOMÉTRICOS PARA A MODELAGEM DA MORFOGRAFIA

Morfologia	Segmentação	Parâmetros
Vales	Vales planos	AC > 1km ² e BTH (raio de 100 metros) < 1 desvio padrão
	Vales abertos	AC > 1km ² e BTH (raio de 100 metros) > 1 e < 3 desvios padrões
	Vales fechados	AC > 1km 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 > 1km
Planície de inundação	Fluvial	Declividade < 3% (em morfogênese fluvial)
	Fluviomarinha	BTH (raio de 500 metros) > 2 e altimetria < 20
Terraços	Remanescente de paleosuperfície	IPT > 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 > 1km ² ; b) Pontos de interseção com declividade < 8%; c) Amplitude da declividade média dos segmentos > 8%; c) Amplitude altimétrica dos segmentos > 60m; (cones pequenos: amplitude altimétrica > 60m e < 100m); (cones intermediários: amplitude altimétrica > 100m e < 200m); (cones grandes: amplitude altimétrica > 200m)

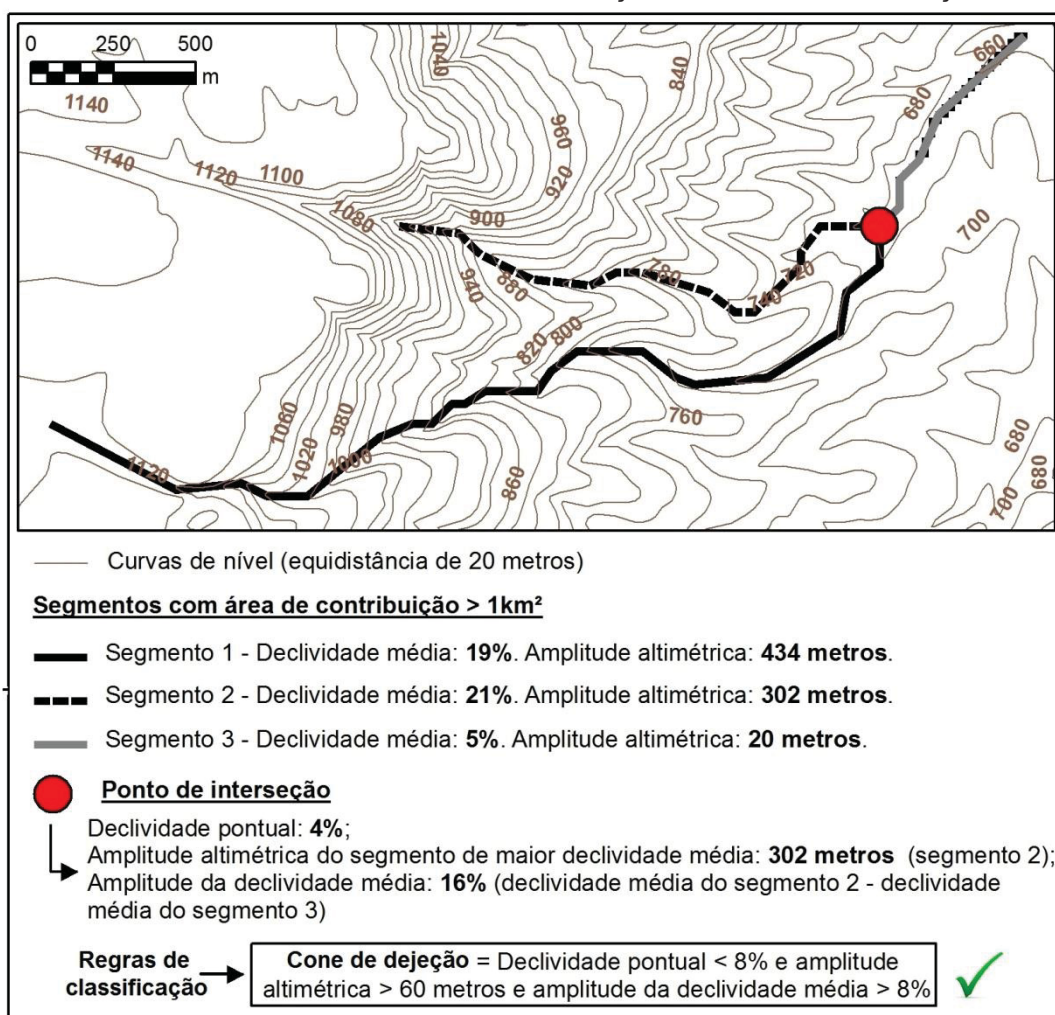
FONTE: o autor (2019)

Por fim, os cones de dejeção foram considerados como pontos planos localizados na interseção de segmentos lineares, definidos pela área de contribuição, que possuem grande amplitude altimétrica e de declividade. A proposta, ilustrada pela FIGURA 14, contém cinco etapas: i) definição dos segmentos lineares a partir da área de contribuição (> 1 km²); ii) atribuição de pontos na interseção dos segmentos (ou seja, pontos de confluência hídrica); iii) cálculo da amplitude altimétrica e declividade média de cada segmento; iv) atribuição da amplitude altimétrica para o segmento que possui a maior declividade média; v)

determinação da amplitude da declividade média (segmento com a maior declividade média subtraído pelo segmento com a menor declividade média).

Dessa forma, são considerados como cones de dejeção os pontos de confluência hídrica com declividade menor que 8%, com amplitude altimétrica maior que 60 metros e amplitude da declividade média dos segmentos maior que 8%. Os cones foram classificados em três níveis, segmentados pela amplitude altimétrica do segmento de maior declividade média: pequenos (> 60 m e < 100 m), intermediários (> 100 m e < 200 m) e grandes (> 200 m). A FIGURA 14, como exemplo, representa um grande cone de dejeção conforme os parâmetros preestabelecidos.

FIGURA 14 - EXEMPLO DE PARAMETRIZAÇÃO DE CONES DE DEJEÇÃO



FONTE: o autor (2019)

3.4.4 Morfometria

A morfometria foi o aspecto que embasou toda a construção do mapeamento geomorfológico, uma vez que a tese está amparada na atribuição de parâmetros morfométricos para caracterizar as demais categorias geomorfológicas. Por esse motivo, a morfometria foi destacada na tese de duas maneiras: implicitamente, com os valores quantitativos atribuídos aos objetos mapeados para a morfogênese, morfografia, morfocronologia e morfodinâmica; e explicitamente, com a representação específica e individualizada de características morfométricas. Optou-se por um número reduzido de informações para evitar o excesso de objetos que dificultam a leitura do mapa em sua totalidade.

Como itens específicos do mapa principal foram incluídos: pontos cotados e curvas de nível (presentes na maioria dos mapas geomorfológicos), a indicação da elevação acima do nível de base local e o relevo sombreado como camada subjacente (com transparência) ilustrando a rugosidade e profundidade do relevo. De modo auxiliar foram acrescentados cartogramas da altimetria, declividade e índice topográfico de umidade, modelados em perspectiva tridimensional pelo *software* ArcScene versão 10.1.

O nível de base foi calculado a partir de um algoritmo implementado no *software* SAGA versão 2.2.2 (CONRAD *et al.*, 2015), que consiste na interpolação dos valores altimétricos da rede de drenagem. Manteve-se o valor de área de contribuição superior a 1 km², seguindo a padronização estabelecida para os demais objetos mapeados por esse atributo, como parâmetro para a determinação dos segmentos de drenagem. A subtração entre o MDT original e o MDT interpolado resultou na elevação acima do nível de base, cujos valores foram indicados nos topos, terraços e remanescentes de paleosuperfícies.

3.4.5 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 km²), que possuem alta declividade média (> 15%) e grande amplitude altimétrica (> 250 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 350 metros; ii) suscetibilidade alta, com amplitude entre 350 e 500 metros; iii) suscetibilidade muito alta, com amplitude altimétrica superior a 500 metros.

A indicação da erosão potencial, por sua vez, foi alocada como cartograma adicional ao mapa principal. Utilizou-se como parâmetro o índice de potência do escoamento, mensurado numa relação entre declividade e área de contribuição (equação 20), que destaca as porções de maior exposição à dinâmica erosiva. Para esse atributo, ao invés da discretização dos valores e atribuição de classes, sua representação foi contínua, a partir da variável visual intensidade, num gradiente entre o valor mínimo e máximo para toda a área de estudo.

Considerando a importância dos fatores exógenos como condicionantes da morfodinâmica, especificamente para essa análise foi incluída uma variável climática que, associada ao índice de potência do escoamento, subsidiou a indicação dos níveis de erosão potencial. Essa associação teve a finalidade de demonstrar a possibilidade de integração das variáveis geomorfométricas com outras variáveis quantitativas de modo auxiliar.

O denominado índice de erosividade climática foi calculado seguindo metodologia elaborada pelo projeto de "riscos de erosão de solos" (CORINE, 1992) dentro do programa CORINE, iniciado em 1985 com o objetivo de sistematizar informações ambientais 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 (equação 21), e o índice ombrotérmico de Bagnouls-Gausson, calculado a partir do balanço de umidade mensal que mensura a aridez climática (equação 22).

$$\text{Índice de Fournier} = \sum (p_i^2 / P) \quad (\text{equação 21})$$

Onde \sum é o somatório dos meses (janeiro a dezembro), p_i é a precipitação total do mês i (em milímetros) e P é a média anual da precipitação total (em milímetros).

$$\text{Índice de Bagnouls Gaussens} = \sum (2t_i - p_i) \cdot k_i \quad (\text{equação 22})$$

Onde t_i é a temperatura média do mês i (em °C), p_i é a precipitação total do mês i (em milímetros) e k_i é a proporção do mês i em que $2t_i - p_i > 0$.

Conforme a proposta metodológica adotada, posteriormente ao cálculo são atribuídos pesos e classes qualitativas para cada índice segmentado. O índice de erosividade climática, por fim, é obtido a partir da multiplicação entre os pesos de ambos (TABELA 6).

TABELA 6 - PARÂMETROS DO ÍNDICE DE EROSIVIDADE CLIMÁTICA

Índice de Fournier-Arnoldus			Índice ombrotérmico de Bagnouls-Gaussens			Índice de erosividade climática (peso FA x peso BG)		
Parâmetro	Descrição	Peso (FA)	Parâmetro	Descrição	Peso (BG)	Parâmetro (FA x BG)	Descrição	Peso
< 60	Muito baixo	1	0	Úmido	1	< 4	Baixo	1
60 a 90	Baixo	2	0 a 50	Moderadamente úmido	2	4 a 8	Moderado	2
90 a 120	Moderado	3	50 a 130	Seco	3	> 8	Alto	3
120 a 160	Alto	4	> 130	Muito seco	4			
> 160	Muito alto	5						

FONTE: o autor (2019), adaptado de Alonso *et al.* (2010)

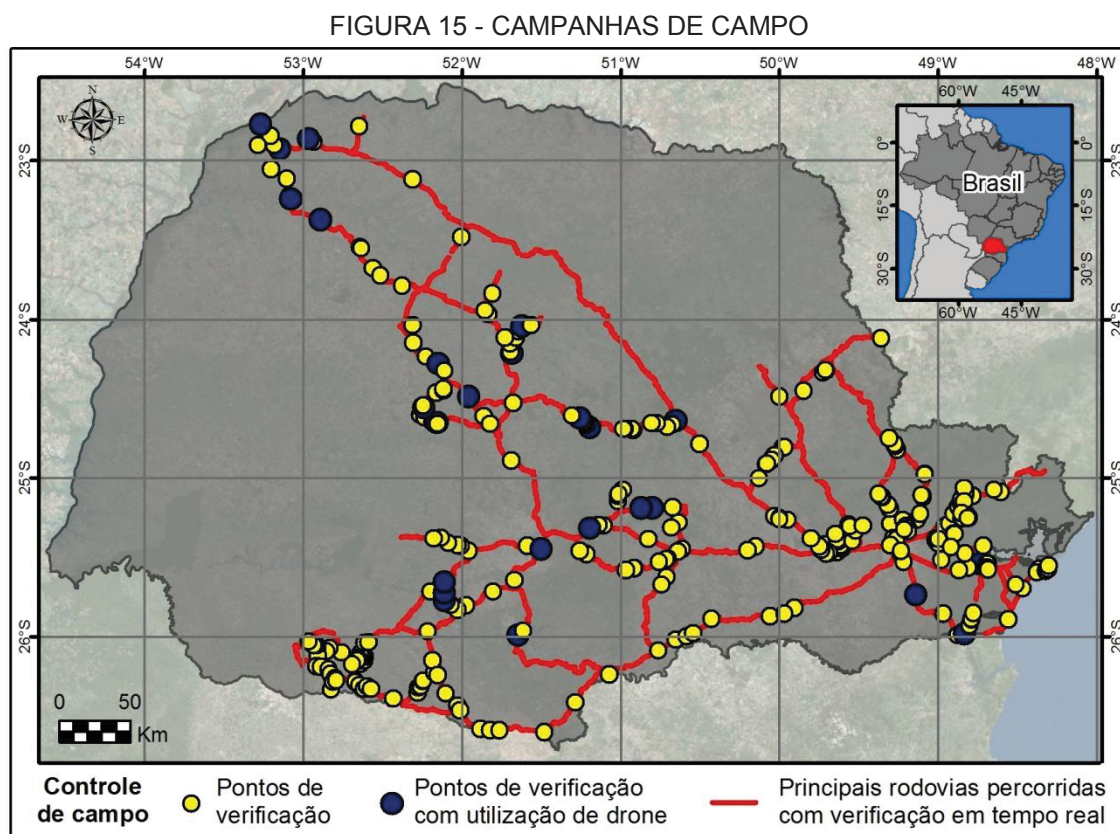
Os dados climáticos utilizados foram disponibilizados pelo acervo *WorldClim*, versão 1.4 (HIJMANS *et al.*, 2005), que consiste num conjunto de dados matriciais, com resolução espacial de 1 km, referentes à precipitação e temperatura no período entre 1960 a 1990 a nível mundial.

Após aplicação no estado do Paraná, para o índice de Fournier-Arnoldus foram identificadas as classes de peso 3, 4 e 5 (moderado, alto e muito alto), enquanto para o índice ombrotérmico de Bagnouls-Gaussens todo o estado foi classificado como úmido (peso 1). Na multiplicação dos pesos adotada pelo índice de erosividade climática, portanto, obteve-se os valores 3, 4 e 5, cujos níveis foram representados de modo complementar ao índice de potência do escoamento.

Em termos de representação cartográfica para indicação da erosão potencial, as três classes do índice de erosividade climática foram indicadas por cores distintas, enquanto o índice de potência do escoamento, com valores contínuos, foi representado conforme gradiente de cada cor (intensidade).

3.5 ETAPAS DE CONFERÊNCIA EM CAMPO

Os trabalhos de campo (FIGURA 15) compuseram parte essencial do mapeamento realizado. Num primeiro momento, findaram a observação *in loco* das feições geomorfológicas de interesse com a inferência preliminar dos parâmetros para cada objeto a ser modelado (somado ao conhecimento prévio sobre as características do relevo do estado do Paraná). Posteriormente, as campanhas de campo auxiliaram na verificação das classificações resultantes da modelagem — e, quando necessário, isso implicou na alteração dos parâmetros, seguido de novos produtos que passaram por nova conferência de campo.



FONTE: o autor (2019)

Para a verificação em campo dos resultados obtidos, foram coletadas fotografias georreferenciadas em pontos representativos do relevo do estado do Paraná, 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 15, foram 323 pontos de análise (com 25 voos de drone) e quase 5000 km percorridos (sem contabilizar as estradas secundárias) com acompanhamento em tempo real do mapeamento resultante no estado do Paraná.

3.6 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 (questões conceituais), objetos geomorfológicos, cores e demais símbolos. A transcrição gráfica, no *software* ArcGIS 10.1, foi baseada na proposta de Maillard *et al.* (2011), da Universidade de Lausanne, 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 no presente trabalho é, portanto, híbrido: 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, equivalentes a “agração” e “degradação”, respectivamente), 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).

Ainda que muitas ideias tenham sido adaptadas, outras foram criadas sem quaisquer referências nos mapas geomorfológicos analisados, tais como: utilização da variável visual valor ou intensidade para distinguir processos morfogenéticos

destrutivos (degradacionais), com tons mais escuros, e construtivos (agradacionais), com tons mais claros; indicação da elevação acima do nível de base local; acréscimo da morfogênese cárstica pela variável visual orientação ou textura de modo associativo a outras morfogêneses; vinculação de alguns objetos morfográficos (planícies de inundação e topos) à morfogênese, com duplicação (associação) das informações na legenda.

Além de híbrido, 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 (tais como a morfogênese eólica, por exemplo, que no estado do Paraná é pouco representativa na escala 1:50.000, ou a morfogênese marinha, que não pôde ser modelada somente com uso de técnicas geomorfométricas). Ainda que se considere a possibilidade de novas implementações ou adaptações, a estruturação do sistema de legenda, por si, reúne soluções cartográficas que possuem uma organização lógica — o que favorece sua replicação, mesmo com pequenas variações ou inclusões na simbologia.

Nos mapas geomorfológicos representativos elaborados, que constam nos apêndices da tese, o sistema de legenda foi inserido com todas as informações para que o leitor ou usuário, ao analisar uma carta específica, tenha a compreensão da abrangência do mapeamento e a totalidade de objetos geomorfológicos contemplados. Nas figuras representativas ao longo do trabalho, por sua vez, foram incluídas somente as informações que aparecem na visualização dos recortes.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A apresentação dos resultados e discussões relacionadas abarca a análise geomorfológica e temática de diversos mapas geomorfológicos do Brasil e do mundo (seção 4.1) que embasou a construção do mapa geomorfológico para o estado do Paraná derivado de classificação geomorfométrica (seção 4.2).

Os resultados do mapeamento são expostos conforme a compartimentação geomorfológica do estado (MAACK, 1981; SANTOS *et al.*, 2006) em Planície Litorânea (seção 4.2.1), Serra do Mar (seção 4.2.2), Primeiro Planalto (seção 4.2.3), Segundo Planalto (seção 4.2.4) e Terceiro Planalto (seção 4.2.5). Por fim, foi realizada uma discussão conclusiva avaliando os resultados da modelagem para o estado do Paraná a partir de uma contextualização geral (seção 4.3).

4.1 ANÁLISE DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS

A etapa de avaliação dos produtos cartográficos sob a perspectiva geomorfológica e temática contemplou a análise de 57 mapas geomorfológicos, sendo 23 mapeamentos nacionais, 6 mapeamentos de estados do Brasil e 28 mapeamentos de regiões, com recortes específicos, de diversos locais do mundo.

Os resultados qualitativos tabulados são apresentados pela TABELA 7, 8, 9, 10 e 11, que indicam: localidade, escala, autoria, ênfase, variáveis visuais utilizadas para a representação dos aspectos geomorfológicos (morfometria, morfografia, morfogênese, morfodinâmica, morfocronologia) e informações adicionais contidas nos mapas. Já as quantificações dos resultados, considerando o conjunto total de mapas interpretados, são dispostas pela FIGURA 16, 17, 18, 19, 20, 21 e 22. As quantificações individualizadas por categoria de análise (nacional, estadual e de regiões) são demonstradas pela TABELA 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18.

Destaca-se, inicialmente, que apenas 32 dos 57 mapas analisados (56% do total) representaram todos os elementos que um mapa geomorfológico deve conter, mesmo considerando as indicações implícitas. Numa análise mais rigorosa, portanto, esse número seria ainda menor. Dos mapas estaduais, apenas São Paulo (ROSS e MOROZ, 1997) contemplou todos os aspectos.

TABELA 7 - ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA E TEMÁTICA DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS (PARTE 1)

LOCALIDADE	ESCALA DO MAPEAMENTO	AUTORIA	ÊNFASE DO MAPA	MORFOMETRIA		MORFOLOGIA		MORFOGÊNESE		MORFODINÂMICA		MORFOCRONOLOGIA	INFORMAÇÕES ADICIONAIS
				Implantação	Variável visual	Implantação	Variável visual	Implantação	Variável visual	Implantação	Variável visual		
Alemanha	1:25.000 e 1:100.000	Sistema de mapeamento GMK (LESER e STÄBLEIN, 1975)	Morfogênese e morfodinâmica	Linha	Forma	Ponto	Forma	Polígono	Cor e intensidade	Ponto	Forma	Implícita à morfogênese	Formações superficiais e sub-superficiais
Austrália	1:100.000	Projeto CRC LEMME (ANAND e BROEKERT, 2004)	Morfografia	Polígono	Criação	Ponto	Forma (códigos alfanuméricos)	Polígono	Forma, cor e granulação	Polígono	Forma	Implícita à morfogênese	Regolitos; Depósitos minerais; Geologia; Perfis esquemáticos
Bolívia	1:1.000.000	SERGEOMIN (2018)	Morfogênese	Polígono	Não consta	Polígono	Forma	Polígono	Cor e intensidade	Polígono	Cor e intensidade	Não consta	Não consta
Brasil	1:1.000.000	Projeto RADAMBRASIL (BARBOSA <i>et al.</i> , 1984)	Morfografia e morfogênese	Polígono	Associação à morfografia para classes de dissecação	Polígono	Forma e orientação	Polígono	Forma	Polígono	Não consta	Implícita à morfogênese	Perfil esquemático; Legenda explicativa estendida
China	1:1.000.000	Atlas Geomorfológico da República Popular da China (CHENG <i>et al.</i> , 2011)	Morfografia e morfogênese	Polígono	Associação à morfografia e morfogênese	Polígono	Forma e cor	Polígono	Cor e intensidade	Polígono	Não consta	Não consta	Formações superficiais; Litologia
Croácia	1:100.000	Buzjak <i>et al.</i> (2013)	Morfogênese	Polígono	Pontos cotados	Ponto	Forma	Polígono	Forma	Ponto	Forma	Implícita à morfogênese	Geologia; Cartogramas de hipsometria, declividade e amplitude altimétrica
Cuba	1:1.000.000	Peraza <i>et al.</i> (1989)	Morfogênese	Polígono	Curvas de nível	Polígono	Forma	Polígono	Forma	Polígono	Forma	Implícita à morfogênese	Cartograma de regionalização geomorfológica
Equador	1:200.000	Programa Nacional de Regionalização Agrária (PRONAREG) (ALMEIDA <i>et al.</i> , 1974)	Morfogênese	Polígono	Forma (classe alfanumérica)	Ponto	Forma (códigos alfanuméricos)	Polígono	Cor, granulação e forma	Polígono	Não consta	Polígono	Geologia; Perfis esquemáticos
Espanha (2006)	1:50.000	Instituto Geológico y Minero de España (GARCIA e CERDAN, 2006)	Morfogênese e morfografia	Polígono	Curvas de nível	Polígono	Forma e cor	Polígono	Forma	Polígono	Forma	Implícita à morfogênese	Formações superficiais; Perfis geomorfológicos; Cartogramas de declividade, litologia, clima e morfoestrutura
Espanha (2005)	1:1.000.000	Instituto Geológico y Minero de España (GARCIA <i>et al.</i> , 2005)	Morfogênese e morfografia	Polígono	Curvas de nível	Ponto	Forma	Polígono	Forma, cor e granulação e orientação	Polígono	Forma	Implícita à morfogênese	Formações superficiais; Perfis geomorfológicos; Cartogramas de declividade, litologia, clima e morfoestrutura
França	1:50.000	Tricart (1970)	Morfogênese	Polígono	Curvas de nível	Polígono	Forma, cor e granulação e orientação	Polígono	Forma, cor e granulação e orientação	Polígono	Forma	Implícita à morfogênese	Formações superficiais; Perfis geomorfológicos; Cartogramas de declividade, litologia, clima e morfoestrutura

FONTE: o autor (2019)

TABELA 8 - ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA E TEMÁTICA DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS (PARTE 2)

LOCALIDADE	ESCALA DO MAPEAMENTO	AUTORIA	ÊNFASE DO MAPA	MORFOLOGIA		MORFOGÊNESE		MORFODINÂMICA		MORFOCRONOLOGIA	INFORMAÇÕES ADICIONAIS	
				MORFOMETRIA	MORFOGRAFIA	Implantação	Variável visual	Implantação	Variável visual			Implantação
Países Baixos	1:50.000	Koomen e Maas (2004)	Morfografia e morfometria	Implantação	Polígono	Cor, intensidade e forma	Implantação	Implantação	Não consta	Implantação	Associada à morfografia	Extensa legenda explicativa
Itália	1:50.000	Servizio Geologico Nazionale (SGN, 1994)	Morfogênese e morfografia	Ponto	Ponto	Forma e cor	Implantação	Ponto	Forma, cor e intensidade	Implícita à litologia	Litologia; Cartogramas (variáveis em casa carta) de clima, declividade, unidades morfológicas, suscetibilidade a movimentos de massa e perfis esquemáticos.	
Israel	1:500.000	Survey of Israel (NIR, 1978)	Litologia e morfografia	Implantação	Polígono	Cor, intensidade, forma, granulação e orientação	Implantação	Implícita à morfografia	Implícita à morfografia	Implícita à litologia	Não consta	
Polónia (1982)	1:500.000	Gilewska et al. (1982)	Morfografia	Implantação	Polígono	Forma e tamanho	Implantação	Implícita à morfografia	Cor e forma	Implícita à morfografia	Não consta	
Polónia (2015)	1:100.000	Raczkowska e Zwoliński (2015)	Morfogênese e morfografia	Implantação	Polígono	Cor, intensidade e forma	Implantação	Implícita à morfografia	Cor e forma	Implícita à morfografia e morfogênese	Não consta	
Quênia	1:500.000	Oosterom (1988)	Morfografia	Implantação	Polígono	Forma e granulação	Implantação	Implícita à morfografia	Forma	Implícita à morfografia	Tabela estratigráfica	
República Tcheca	1:500.000	Demek et al. (2009)	Morfogênese e morfografia	Ponto	Polígono	Forma e cor	Implantação	Implícita à morfografia	Forma	Implícita à morfografia e morfogênese	Não consta	
Romênia	1:200.000	Institut de Geografie (BADEA e SANDU, 1992)	Morfografia e morfogênese	Ponto	Polígono	Forma e granulação e orientação	Implantação	Implícita à morfografia	Forma	Implícita à morfogênese	Não consta	
Rússia	1:16.000.000	Novosibirsk State University (NSU)	Morfografia	Implantação	Polígono	Forma e cor	Implantação	Implícita à morfografia	Não consta	Implícita à morfografia	Depósitos	

FONTE: o autor (2019)

TABELA 9 - ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA E TEMÁTICA DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS (PARTE 3)

LOCALIDADE	ESCALA DO MAPEAMENTO	AUTORIA	ÊNFASE DO MAPA	MORFOLOGIA			MORFOGÊNESE	MORFODINÂMICA	MORFOCRONOLOGIA	INFORMAÇÕES ADICIONAIS		
				MORFOMETRIA	MORFOGRAFIA	MORFOLOGIA						
				Implantação	Variável visual	Implantação	Variável visual	Implantação	Variável visual			
Sri Lanka	1:1.000.000	Verstappen e Hoshitzky (1987)	Morfografia	Ponto	Pontos cotados	Linha Polígono	Forma, cor e granulação Cor	Polígono	Forma cor e granulação	Associada à morfografia	Associada à morfografia	Litologia
Espírito Santo	1:250.000	USNUFES (COELHO <i>et al.</i> , 2012)	Morfografia	Não consta	Não consta	Polígono	Cor, intensidade e forma	Polígono	Cor, intensidade e forma	Implícita à morfografia	Implícita à morfografia	Relatório descritivo
Goias	1:250.000	Superintendência de Geologia e Mineração (LATRUBESSE e CARVALHO, 2006)	Morfografia	Não consta	Não consta	Polígono	Cor	Polígono	Cor	Implícita à morfografia	Implícita à morfografia	Relatório descritivo
Paraná	1:250.000	UFFPR/Mineropar (SANTOS <i>et al.</i> , 2006; OKA-FIORI <i>et al.</i> , 2006)	Morfografia	Associada à tabela descritiva, à parte)	Associada à morfografia (em tabela descritiva, à parte)	Polígono	Cor e intensidade	Polígono	Cor e intensidade	Implícita à morfografia	Implícita à morfografia	Atlas descritivo
Rio de Janeiro	1:250.000	Projeto Rio de Janeiro (CPRM, 2000)	Morfografia	Implícita à morfografia	Implícita à morfografia	Polígono	Cor e intensidade	Polígono	Cor e intensidade	Implícita à morfografia	Implícita à morfografia	Não consta
Rio Grande do Norte	1:250.000	Diniz <i>et al.</i> (2017)	Morfografia	Associada à tabela descritiva, à parte)	Associada à morfografia (em tabela descritiva, à parte)	Polígono	Cor e intensidade	Polígono	Cor e intensidade	Implícita à morfografia	Implícita à morfografia	Não consta
São Paulo	1:500.000	Ross e Moroz (1997)	Morfografia	Polígono	Associada à morfografia	Polígono	Forma (códigos alfanuméricos) Cor e forma	Polígono	Forma	Associada à morfografia	Implícita à morfografia	Solos; Litologia; Fragilidade potencial
Argentina (Mendoza)	1:100.000	Abraham (1996)	Morfografia	Não consta	Não consta	Ponto Polígono	Forma Forma e granulação	Ponto Linha	Forma e cor Forma	Associada à morfografia	Associada à morfografia	Não consta
Argentina (Quebrada de Puramarca, Jujuy)	1:10.000	May (2008)	Morfogênese e morfodinâmica	Ponto	Pontos cotados	Linha	Forma	Ponto	Forma	Polígono	Polígono	Implícita à morfogênese
Chile (Glaciar Pasterze)	1:12.500	Geilhausen e Schrott (2012)	Morfodinâmica	Linha	Curvas de nível e forma	Linha Polígono	Forma Cor	Ponto	Forma	Polígono	Polígono	Implícita à geologia, declividade e vegetação
Brazil (Gauva, Santa Catarina)	1:65.000	Oliveira e Vieira (2009)	Morfografia	Polígono	Cor (cartograma de declividade à parte)	Polígono	Forma, cor e granulação Cor e intensidade	Polígono	Forma, cor e granulação Cor e intensidade	Polígono	Polígono	Cartograma de geologia e declividade
Brazil (São Pedro, São Paulo)	1:50.000	Queiroz Neto e Journaux (1977)	Morfografia	Ponto	Pontos cotados	Ponto	Forma	Ponto	Forma	Associada à morfografia	Ponto	Forma (códigos alfanuméricos)
Chile (Península Juan Mazza, Terra do Fogo)	1:50.000	Muro <i>et al.</i> (2015)	Morfogênese e morfodinâmica	Linha	Curvas de nível	Linha Polígono	Forma, cor e granulação Cor e intensidade	Ponto	Forma, cor e granulação Cor e intensidade	Polígono	Polígono	Depósitos; Dinâmica costeira
Espanha (Sierra Gorda)	1:33.000	Caballero <i>et al.</i> (2016)	Morfografia e morfogênese	Ponto	Forma e intensidade numérico	Ponto	Forma	Polígono	Forma	Polígono	Polígono	Litologia
				Linha	Curvas de nível	Polígono	Forma e cor Cor, intensidade e granulação	Polígono	Forma e cor Cor, intensidade e granulação	Polígono	Polígono	

FONTE: o autor (2019)

TABELA 10 - ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA E TEMÁTICA DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS (PARTE 4)

LOCALIDADE	ESCALA DO MAPEAMENTO	AUTORIA	ÉNFASE DO MAPA	MORFOLOGIA		MORFOGRAFIA		MORFOGÊNESE		MORFODINÂMICA		MORFOCRONOLOGIA	INFORMAÇÕES ADICIONAIS	
				MORFOMETRIA	MORFOLOGIA	MORFOGRAFIA	MORFOGRAFIA	MORFOGÊNESE	MORFOGÊNESE	MORFODINÂMICA	MORFOCRONOLOGIA			
				Implantação	Variável visual	Implantação	Variável visual	Implantação	Variável visual	Implantação	Variável visual	Implantação	Variável visual	
Espanha (Burgos)	1:25.000	Calvo e González (2015)	Morfogênese e morfocronologia	Ponto	Pontos cotados	Linha	Cor e forma	Polígono	Cor e forma	Polígono	Implícita à morfografia e morfogênese	Polígono	Cor, intensidade e forma	Geologia; Perfis esquemáticos; Representação em 3D
Espanha (Alta Ribagorza)	1:50.000	Cia e Andrés (2008)	Litologia e morfodinâmica	Linha	Curvas de nível	Linha	Forma e cor	Ponto	Forma e cor	Polígono	Forma e cor	Polígono	Forma e cor	Litologia; Fotografias aéreas; Relevo sombreado
Etiópia (Monte Amba Akadam, Tigray)	1:25.000	Coltorti et al. (2009)	Morfocronologia	Ponto	Pontos cotados	Linha	Forma e cor	Polígono	Implícita à morfocronologia	Polígono	Forma e cor	Polígono	Cor e forma	Perfil esquemático
Grécia (Delta do rio Pínios)	1:15.000	Karymbalis et al. (2016)	Morfografia e morfodinâmica	Linha	Curvas de nível	Polígono	Forma e cor	Polígono	Associada à morfografia	Polígono	Forma e cor	Polígono	Forma e cor	Dinâmica costeira, litologia e tabela com dados descritivos
Itália (Parque Nacional Lagonegrese)	1:50.000	Giano (2016)	Morfografia e morfogênese	Linha	Curvas de nível	Polígono	Forma e cor	Polígono	Associada à morfografia (cor)	Polígono	Associada à morfografia	Polígono	Implícita à geologia	Mapa geológico do Quaternário; Cartograma de leques aluviais
Itália (Basilicata)	1:16.000	Benitvenga et al. (2015)	Litologia	Ponto	Pontos cotados	Linha	Forma e cor	Polígono	Associada à morfografia e morfodinâmica	Polígono	Forma	Polígono	Cor e granulação (associada à litologia)	Elementos tectônicos; Cartograma de relevo sombreado
Itália (Montanhas de Matese)	1:20.000	Aucelli et al. (2013)	Morfogênese	Ponto	Pontos cotados	Linha	Forma	Polígono	Associada à morfografia (cor)	Polígono	Implícita à morfografia e morfogênese	Polígono	Implícita à litologia	Cartograma de litologia; Perfil geológico esquemático; Ilustrações 3D
Itália (Porto Fino)	1:5.000	Faccini et al. (2008)	Morfodinâmica	Ponto	Forma e pontos cotados	Linha	Forma	Polígono	Associada à morfografia e morfodinâmica	Polígono	Forma	Polígono	Não consta	Mapa geológico; Mapa geotécnico; Cartograma de declividade
Itália (Península de Salento)	1:120.000	Forte e Pennetta (2007)	Morfogênese e morfografia	Linha	Curvas de nível	Linha	Cor	Polígono	Associada à morfografia	Polígono	Forma	Polígono	Implícita à geologia	Cartograma de litologia e relevo sombreado
Islândia (Eskifjörður)	1:7.500	Icelandic Meteorological Office (JENSEN, 2002)	Morfodinâmica	Linha	Curvas de nível	Polígono	Forma, cor, granulação e orientação	Polígono	Associada à morfodinâmica	Polígono	Forma, cor, granulação e orientação	Polígono	Associada à morfodinâmica	Não consta
Libia (Saara Central)	1:250.000	Perego et al. (2011)	Morfogênese e morfografia	Linha	Curvas de nível	Polígono	Forma e orientação	Polígono	Associada à morfografia	Polígono	Implícita à morfografia	Polígono	Implícita à morfografia	Cartograma de altimetria; Composição de Landsat

FONTE: o autor (2019)

TABELA 11 - ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA E TEMÁTICA DE MAPAS GEOMORFOLÓGICOS (PARTE 5)

LOCALIDADE	ESCALA DO MAPEAMENTO	AUTORIA	ÊNFASE DO MAPA	MORFOLOGIA			MORFOGENESE			MORFODINÂMICA			MORFOCRONOLOGIA			INFORMAÇÕES ADICIONAIS
				MORFOMETRIA	MORFOGRAFIA	MORFOGENESE	MORFODINÂMICA	MORFOCRONOLOGIA	MORFOCRONOLOGIA	MORFOCRONOLOGIA	MORFOCRONOLOGIA	MORFOCRONOLOGIA	MORFOCRONOLOGIA	MORFOCRONOLOGIA		
				Implantação	Variável visual	Implantação	Variável visual	Implantação	Variável visual	Implantação	Variável visual	Implantação	Variável visual	Implantação	Variável visual	
Malta (Costa Noroeste)	1:7.500	Devoto <i>et al.</i> (2012)	Morfogênese e morfodinâmica	Ponto	Forma e pontos cotados	Ponto	Forma	Forma e cor	Forma e cor	Forma e cor	Forma e cor	Ponto	Forma	Forma e cor	Forma e cor	Perfis esquemáticos; Geologia; Cartograma de terraços; Representação em 3D
Montenegro (Montanhas Dumitor)	1:10.000	Annys <i>et al.</i> (2014)	Morfogênese e morfografia	Linha	Forma e curvas de nível	Linha	Forma	Forma e cor	Forma e cor	Forma e cor	Forma e cor	Polígono	Forma e cor	Forma e cor	Forma e cor	Cartograma de altimetria e relevo sombreado; Vegetação
Noruega (Nordenskiöldbreen)	1:10.000	Allaart (2016)	Morfodinâmica	Linha	Curvas de nível	Linha	Forma e cor	Forma e cor	Forma e cor	Forma e cor	Forma e cor	Linha	Forma	Forma e cor	Forma e cor	Substrato rochoso
Portugal (Serra da Arrábida)	1:50.000	Fonseca <i>et al.</i> (2014)	Morfogênese	Ponto	Pontos cotados	Ponto	Forma	Forma	Forma	Forma	Forma	Ponto	Forma	Forma	Forma	Geologia
Portugal (Serra de Montejunto)	1:25.000	Fonseca (2011)	Morfografia	Linha	Curvas de nível	Linha	Forma e orientação	Forma e orientação	Forma e orientação	Forma e orientação	Forma e orientação	Ponto	Forma	Forma	Forma	Geologia
Principado de Liechtenstein (Malbun)	1:3.000	Sejmonsbergen e Graaff (2006)	Morfogênese e morfografia	Linha	Curvas de nível (sem cota)	Linha	Forma	Forma	Forma	Forma	Forma	Ponto	Forma e intensidade	Forma e intensidade	Forma e intensidade	Geologia
Romênia (Prahova)	1:25.000	Greuc (2009)	Morfografia	Ponto	Pontos cotados	Ponto	Forma	Forma	Forma	Forma	Forma	Polígono	Forma e intensidade	Forma e intensidade	Forma e intensidade	Processos geomorfológicos e zonas de perigo
Rússia (Bacia de Pechora)	1:1.000.000	Nikolskaya <i>et al.</i> (2002)	Morfogênese	Linha	Curvas de nível (sem cota)	Polígono	Forma	Forma	Forma	Forma	Forma	Polígono	Forma	Forma	Forma	Relevo sombreado
Suíça (Vales Hérens - Alpes)	1:25.000	Otto e Dikau (1994)	Morfogênese e morfodinâmica	Linha	Forma, cor e curvas de nível	Linha	Forma e cor	Forma e cor	Forma e cor	Forma e cor	Forma e cor	Ponto	Forma	Forma	Forma	Não consta
Suíça (Vale Turtmann, Valais)	1:25.000	Lambiel <i>et al.</i> (2016)	Morfogênese e morfodinâmica	Linha	Forma	Ponto	Forma	Forma e granulação	Forma e granulação	Forma e granulação	Forma e granulação	Polígono	Forma	Forma	Forma	Formações superficiais; Cartograma geológico

FONTE: o autor (2019)

Referente à ênfase dos mapeamentos, constatou-se que 26% dos mapas nacionais priorizaram a visualização da morfogênese e morfografia (de modo concomitante), ao passo que 22% dos mapas de regiões enfatizaram a morfografia e outros 22% a morfogênese (TABELA 12). Ao somar a ocorrência de cada aspecto geomorfológico, verificou-se que a morfografia e morfogênese apareceram, cada uma, enfatizadas por 73,9% dos mapas nacionais, enquanto nos mapas de regiões a ocorrência foi de 50% para a morfogênese, 42,9% para a morfografia e 39,3% para a morfodinâmica (TABELA 13). Os mapas estaduais, para ambos os casos, resultaram em 100% com ênfase morfológica.

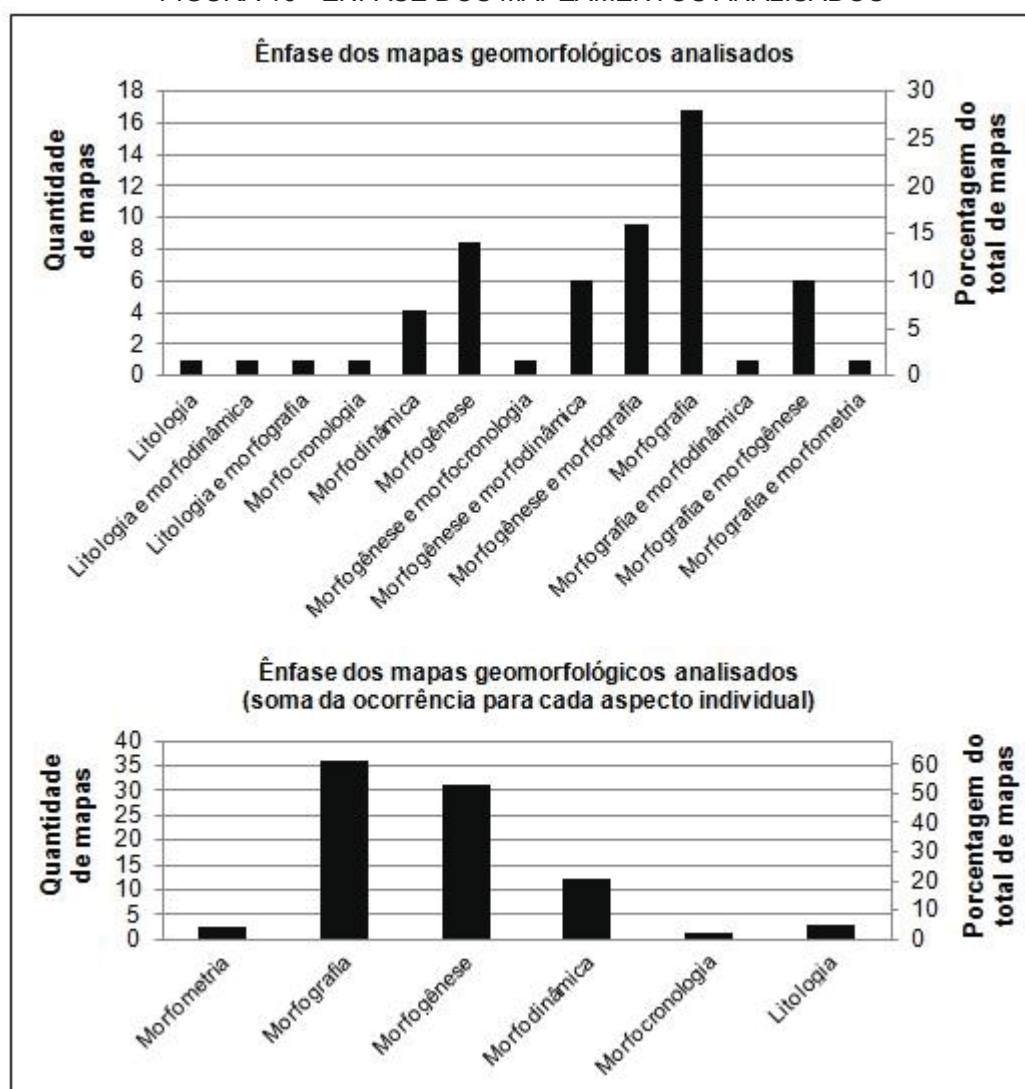
No conjunto total de mapas, a morfografia foi enfatizada por 61,4% e a morfogênese por 52,6%, o que reforça a importância dedicada a esses aspectos no âmbito geral. Por outro lado, a morfometria apareceu como principal aspecto em apenas 3,5% e a morfocronologia em 1,7% da totalidade de mapas (FIGURA 16).

Esses resultados demonstram, num primeiro momento, que há correlação entre o nível de abrangência dos mapeamentos e os objetivos priorizados para a representação geomorfológica. Nos produtos de âmbito nacional, os sistemas de mapeamento majoritariamente se apoiam em unidades morfológicas ou morfogenéticas representadas por grandes polígonos que buscam evidenciar determinado nível de homogeneidade. Em mapas de pequena escala, como China 1:1.000.000 (CHENG *et al.*, 2011) e República Tcheca 1:500.000 (DEMEK *et al.*, 2009), a adoção dessas grandes unidades pode ser justificada pelo caráter generalista da representação, o que dificulta ilustrar as mensurações, idades ou processos atuantes como o aspecto de destaque. Entretanto, mesmo em mapeamentos de grande escala, como o alemão 1:25.000 (LESER e STÄBLEIN, 1975), ou de média escala, como o espanhol (GARCÍA e CERDÁN, 2006) e italiano (SGN, 1994) 1:50.000, há a preocupação em realçar as formas e a gênese do relevo de modo compreensível e aplicável a todo o país. Em outras palavras, ainda que o produto seja de detalhe, a vinculação com o contexto geral, mais amplo, sistematizado, influencia na escolha dos elementos a serem frisados.

Os mapas de regiões, em contrapartida, demonstraram maior flexibilidade para elencar o aspecto geomorfológico salientado. A adoção de recortes específicos e com escalas de detalhe favoreceram a indicação da morfodinâmica, já que mais de 1/3 dos mapas priorizaram esse aspecto. Todos os mapas analisados com escala maior que 1:15.000, por exemplo, possuem a morfodinâmica como elemento de

destaque. Apesar de ser uma tendência, não é um fator excludente, já que dois mapas de média escala (1:50.000), do Chile (MURO *et al.*, 2015) e Espanha (CABALLERO *et al.*, 2016), também ressaltam processos geomorfológicos atuantes. Para a morfometria e morfocronologia, com apenas 3,6% para cada, a flexibilidade oferecida pelos mapas de regiões não alterou a tendência apresentada em relação ao conjunto total de mapas. Especialmente para os mapas de grande escala, chama a atenção o fato de pouco aproveitarem informações morfométricas. A litologia, mesmo não sendo um aspecto elementar do mapa geomorfológico, teve o dobro de ocorrência enfatizada: 7,1%.

FIGURA 16 - ÊNFASE DOS MAPEAMENTOS ANALISADOS



FONTE: o autor (2019)

TABELA 12 - ÊNFASE DOS MAPEAMENTOS ANALISADOS

Ênfase do mapeamento	Abrangência do mapeamento					
	Países		Estados (Brasil)		Regiões	
	Quantidade	%	Quantidade	%	Quantidade	%
Litologia	0	0	0	0	1	3.6
Litologia e morfodinâmica	0	0	0	0	1	3.6
Litologia e morfografia	1	4	0	0	0	0.0
Morfocronologia	0	0	0	0	1	3.6
Morfodinâmica	0	0	0	0	4	14.3
Morfogênese	5	22	0	0	3	10.7
Morfogênese e morfocronologia	0	0	0	0	1	3.6
Morfogênese e morfodinâmica	1	4	0	0	5	17.9
Morfogênese e morfografia	6	26	0	0	3	10.7
Morfografia	5	22	6	100	5	17.9
Morfografia e morfodinâmica	0	0	0	0	1	3.6
Morfografia e morfogênese	4	17	0	0	2	7.1
Morfografia e morfometria	1	4	0	0	1	3.6

FONTE: o autor (2019)

TABELA 13- ÊNFASE DOS MAPEAMENTOS ANALISADOS POR OCORRÊNCIA EM CADA ASPECTO GEOMORFOLÓGICO

Ênfase do mapeamento (soma da ocorrência para cada aspecto individual)	Abrangência do mapeamento					
	Países		Estados (Brasil)		Regiões	
	Quantidade	%	Quantidade	%	Quantidade	%
Morfometria	1	4.3	0	0	1	3.6
Morfografia	17	73.9	6	100	12	42.9
Morfogênese	17	73.9	0	0	14	50.0
Morfodinâmica	1	4.3	0	0	11	39.3
Morfocronologia	0	0.0	0	0	1	3.6
Litologia	1	4.3	0	0	2	7.1

FONTE: o autor (2019)

Quanto aos mapas estaduais, o principal ponto de destaque é a padronização verificada. Todos os mapeamentos expuseram como destaque a morfografia, com grandes unidades homogêneas e cuja interpretação de outros aspectos aparece de modo implícito ou associado às próprias unidades – diferentemente do mapa de âmbito nacional, realizado pelo Projeto RADAMBRASIL (BARBOSA *et al.*, 1984) na escala 1:1.000.000, que mesmo em escala menor representa um número maior de objetos e aspectos geomorfológicos.

As semelhanças podem ser justificadas pelas metodologias comumente utilizadas para a realização dos mapeamentos no Brasil, que priorizam a identificação e caracterização de unidades morfográficas homogêneas. Os mapas do estado do Paraná (SANTOS *et al.*, 2006), de São Paulo (ROSS e MOROZ, 1997)

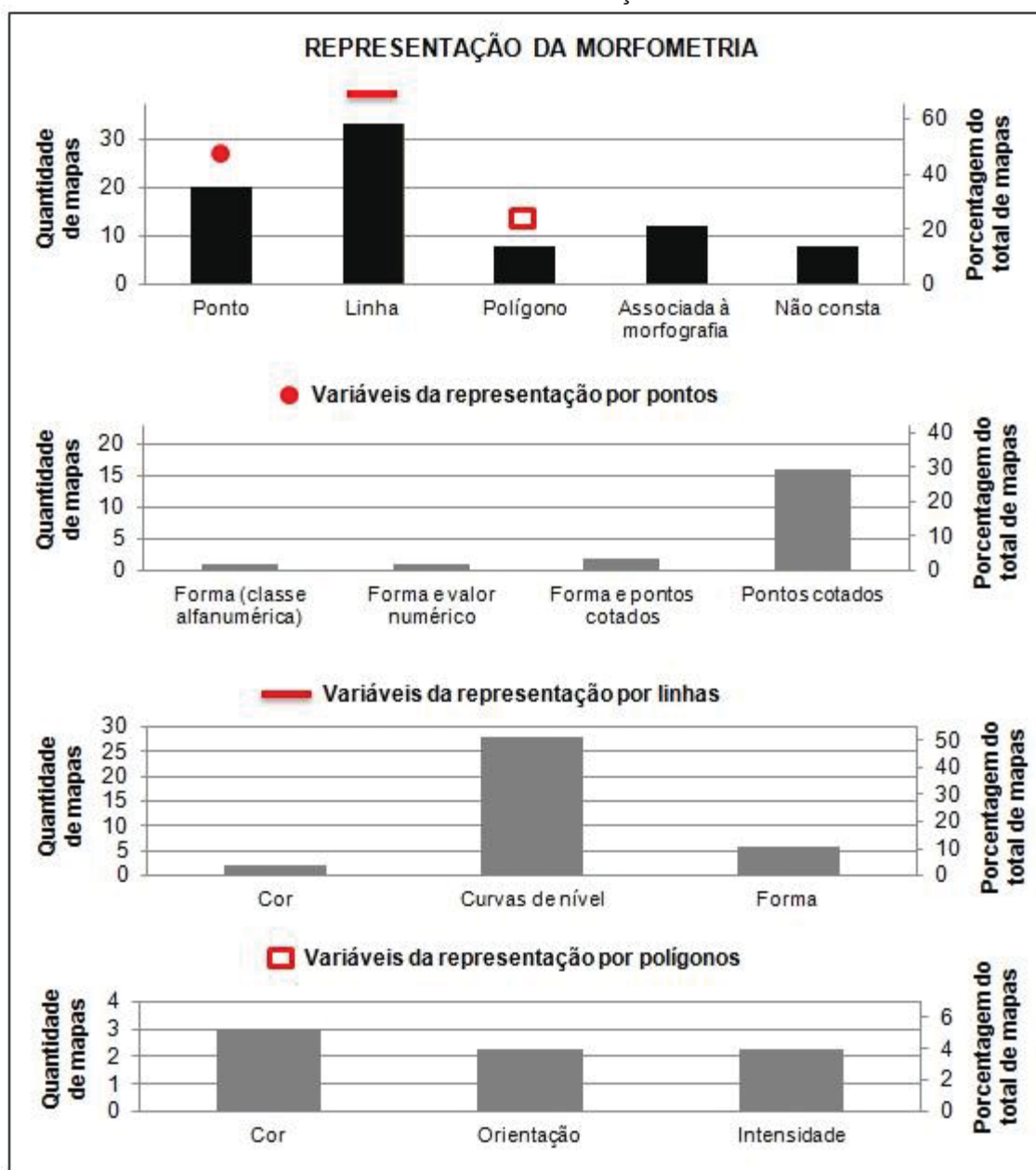
e do Rio Grande do Norte (DINIZ *et al.*, 2017) seguem a proposta hierárquica taxonômica de Ross (1992), embasada pelos conceitos de morfoestrutura e morfoescultura da escola russa (MESCHERJAKOV, 1968; GERASSIMOV e MESCHERIKOV, 1968). O mapa do Espírito Santo (COELHO *et al.*, 2012) segue proposição derivada do próprio Projeto RADAMBRASIL (IBGE, 2009), com os modelados de agradação, dissecação e aplanamento. Os mapeamentos de Goiás (LATRUBESSE e CARVALHO, 2006) e Rio de Janeiro (CPRM, 2000), mesmo com informações específicas apresentam elementos de ambas as propostas.

Assim, para essa categoria, denota-se a ênfase da representação por níveis hierárquicos (ou taxonômicos, em unidades ou modelados). Entretanto, constatou-se uma significativa diferença em relação aos mapas nacionais e de regiões analisados que também enfatizam a morfografia. Há, nos mapas estaduais, uma dependência em relação às unidades morfográficas, enquanto os outros aspectos geomorfológicos são por vezes suprimidos ou secundarizados, limitando-se a interpretações implícitas ou associadas aos polígonos ou necessidade de consulta a extensos relatórios descritivos adicionais. Em mapeamentos como o da Polônia 1:500.000 (GILEWSKA *et al.*, 1982) ou 1:100.000 (RACZKOWSKA e ZWOLIŃSKI, 2015), por exemplo, prioriza-se a morfografia sem que haja omissão de outras dimensões de representação geomorfológica.

Os resultados referentes à análise da representação da morfometria indicaram que os pontos cotados e as curvas de nível são as principais variáveis utilizadas, aparecendo em 28% e 49,1% do total de mapas, respectivamente (FIGURA 17). A predominante adoção de pontos (35%) e linhas (57,8%) como feições geométricas, bem como a baixa representação morfométrica por polígonos (14%), portanto, é justificada pela facilidade de inclusão de dados planialtimétricos elementares que constam em cartas topográficas utilizadas como base para os mapeamentos.

Dos 57 mapas interpretados, 8 (14%) não representaram quaisquer elementos morfométricos, enquanto 12 (21%) tiveram a representação associada à morfografia, principalmente vinculada aos polígonos de unidades homogêneas com a indicação alfanumérica de padrões mensuráveis do relevo. Essa característica foi evidenciada apenas para mapas com escala menor que 1:50.000, sendo uma solução para indicações quantitativas mesmo em escalas médias e pequenas.

FIGURA 17 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFOMETRIA



FONTE: o autor (2019)

Ao categorizar os dados da avaliação morfométrica (TABELA 14), constatou-se que os mapas nacionais utilizam mais polígonos (21,7%) e menos linhas (30,4%) do que o conjunto total, enquanto os pontos se mantêm proporcionais (30,4%). Dos mapas de regiões destaca-se a majoritária adoção de feições lineares, em 85,7% dos produtos, e também maior diversidade na escolha das variáveis visuais. Os mapas estaduais sequer incluem pontos cotados ou curvas de nível aos produtos cartográficos.

De todos os mapas, destaca-se a representação morfométrica do mapeamento alemão (LESER e STÄBLEIN, 1975), tanto na escala 1:25.000 quanto

1:100.000, com linhas em diversos formatos e polígonos orientados que conferem ampla caracterização das dimensões do relevo. Por outro lado, a leitura do mapa é dificultada em função do excesso de informações cartografadas. Outro mapeamento de destaque, nesse aspecto, é o holandês 1:50.000 (KOOMEN e MAAS, 2004), cujo sistema de mapeamento teve como base unidades definidas por intervalos morfométricos (declividade e amplitude altimétrica) associada à atribuição morfográfica qualitativa.

TABELA 14 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFOMETRIA

Morfometria (Representação / Variável)	Abrangência do mapeamento					
	Países		Estados (Brasil)		Regiões	
	Quantidade	%	Quantidade	%	Quantidade	%
Ponto	7	30.4	0	0	13	46.4
<i>Forma (classe alfanumérica)</i>	1	4.3	0	0	0	0
<i>Forma e valor numérico</i>	0	0	0	0	1	3.6
<i>Forma e pontos cotados</i>	0	0	0	0	2	7.1
<i>Pontos cotados</i>	6	26	0	0	10	35.7
Linha	7	30.4	0	0	24	85.7
<i>Cor</i>	0	0	0	0	2	7.1
<i>Curvas de nível</i>	6	26	0	0	20	71.4
<i>Forma</i>	1	4.3	0	0	5	17.9
Polígono	5	21.7	1	17	2	7.1
<i>Cor</i>	2	8.7	0	0	1	3.6
<i>Orientação</i>	1	4.3	0	0	1	3.6
<i>Intensidade</i>	2	8.7	0	0	0	0
Associada à morfografia	9	39.1	3	50	0	0
Não consta	5	21.7	2	33	1	3.6

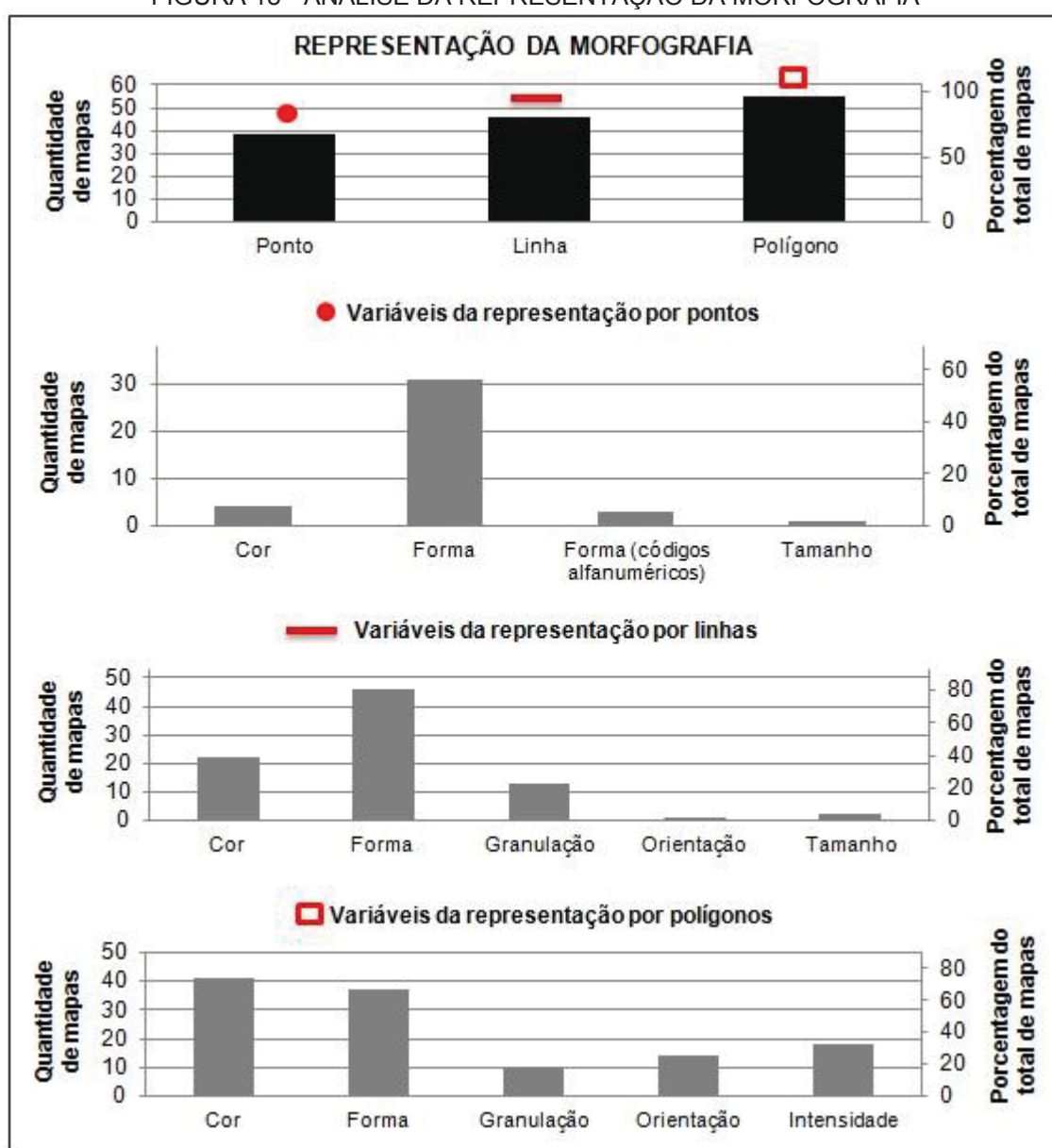
FONTE: o autor (2019)

Para a morfografia, denotada pela análise como o aspecto de maior destaque dos mapas geomorfológicos, já que 100% dos mapas conferidos indicaram a aparência do relevo, destaca-se a expressiva utilização de polígonos, com 96,4%, seguida de 80,7% para linhas e 66,6% para pontos (FIGURA 18). Além disso, o emprego de polígonos associado à diferenciação por cores corrobora, numa perspectiva temática, a ênfase dos mapeamentos dada à morfografia, conforme discutido anteriormente. Isso por que, visualmente, a representação de área com cores é o elemento em evidência do mapa.

Além da cor, a variável visual forma também foi aplicada de modo significativo: consta em 54,3% dos mapas implantada na forma de pontos, 80,7% em linhas e 64,9% em polígonos. Principalmente para mapas em que as cores foram

atribuídas à morfogênese, a solução cartográfica para representação da morfografia se deu a partir da inclusão de símbolos (formas), como nos mapas da Croácia (BUZJAK *et al.*, 2013), do Equador (ALMEIDA *et al.*, 1974), da Itália (SGN, 1994), do Monte Durmitor em Montenegro (ANNYS *et al.*, 2014) ou Vale Turtmann na Suíça (LAMBIEL *et al.*, 2016). Também há os casos em que a variável forma foi implantada para subdividir classes morfológicas indicadas por cores, como no mapeamento brasileiro (BARBOSA *et al.*, 1984) e do estado de São Paulo (ROSS e MOROZ, 1997).

FIGURA 18 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFOGRAFIA



FONTE: o autor (2019)

Na análise por nível de abrangência (TABELA 15), observou-se a mesma tendência apresentada em relação à morfometria: i) ampla utilização de feições geométricas e maior conformidade de representação entre pontos (82,6%), linhas (87%) e polígonos (95,7%) nos mapas nacionais; ii) destacada inserção de linhas (92,9%) e polígonos (96,4%) nos mapas de regiões; iii) padronização dos mapas estaduais, cujas unidades morfográficas homogêneas (polígonos) são o elo comum entre os cinco produtos.

TABELA 15 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFOGRAFIA

Morfografia (Representação / Variável)	Abrangência do mapeamento					
	Países		Estados (Brasil)		Regiões	
	Quantidade	%	Quantidade	%	Quantidade	%
Ponto	19	82.6	1	16.7	18	64.3
<i>Cor</i>	2	8.7	0	0	2	7.14
<i>Forma</i>	19	82.6	1	16.7	18	64.3
<i>Tamanho</i>	1	4.3	0	0	0	0
Linha	20	87.0	0	0	26	92.9
<i>Cor</i>	9	39.1	0	0	12	42.9
<i>Forma</i>	20	87.0	0	0	26	92.9
<i>Granulação</i>	10	43.5	0	0	3	10.7
<i>Orientação</i>	1	4.3	0	0	0	0
<i>Tamanho</i>	2	8.7	0	0	0	0
Polígono	22	95.7	6	100	27	96.4
<i>Cor</i>	18	78.3	5	83.3	17	60.7
<i>Forma</i>	15	65.2	2	33.3	20	71.4
<i>Granulação</i>	6	26.1	0	0	4	14.3
<i>Orientação</i>	7	30.4	0	0	6	21.4
<i>Intensidade</i>	12	52.2	4	66.7	2	7.14

FONTE: o autor (2019)

Em termos gerais, a morfografia foi o aspecto analisado que contabilizou a maior diversidade de variáveis visuais utilizadas. Embora tenham sido verificadas semelhanças na representação, sobretudo em mapas cujas metodologias seguiram influência de uma mesma escola, cabe ressaltar que essa grande variedade reforça uma problemática central da cartografia geomorfológica em relação à sistematização de legendas. Nesse sentido, os resultados demonstrados pelas tabulações corroboram com as discussões apresentadas desde a década de 1960 (COLTRINARI, 2011; VERSTAPPEN, 2011; DRAMIS *et al.*, 2011; OTTO *et al.*, 2011), onde a pluralidade de escalas, ênfases e objetivos, contextos geomorfológicos e níveis de detalhamento pretendidos expõem a complexidade e dificuldade de padronizar a representação.

Em situação oposta à morfografia, o aspecto morfogenético foi o que apresentou maior uniformidade de representação (FIGURA 19). Do total de mapas, 40,3% indicaram a morfogênese com uso de polígonos, dos quais 35% a partir da variável cor, não havendo registro de pontos e linhas. Desde as primeiras propostas que buscaram a sistematização de legendas, como Demek (1972), até as recentes, como Gustavsson *et al.* (2006), há uma concordância em relação à representação da morfogênese (comumente associada aos processos atuantes) por cores com feição de área. Com exceção dos mapas poloneses, que aplicaram cores específicas conforme proposta de Klimaszewski (1963a), todos os demais mapas que enfatizaram a morfogênese, por exemplo, representaram a gênese tectônica ou endogenética em vermelho, a fluvial em verde, glacial em roxo, marinha ou lacustre em azul, denudacional em laranja e eólica ou agradacional em amarelo.

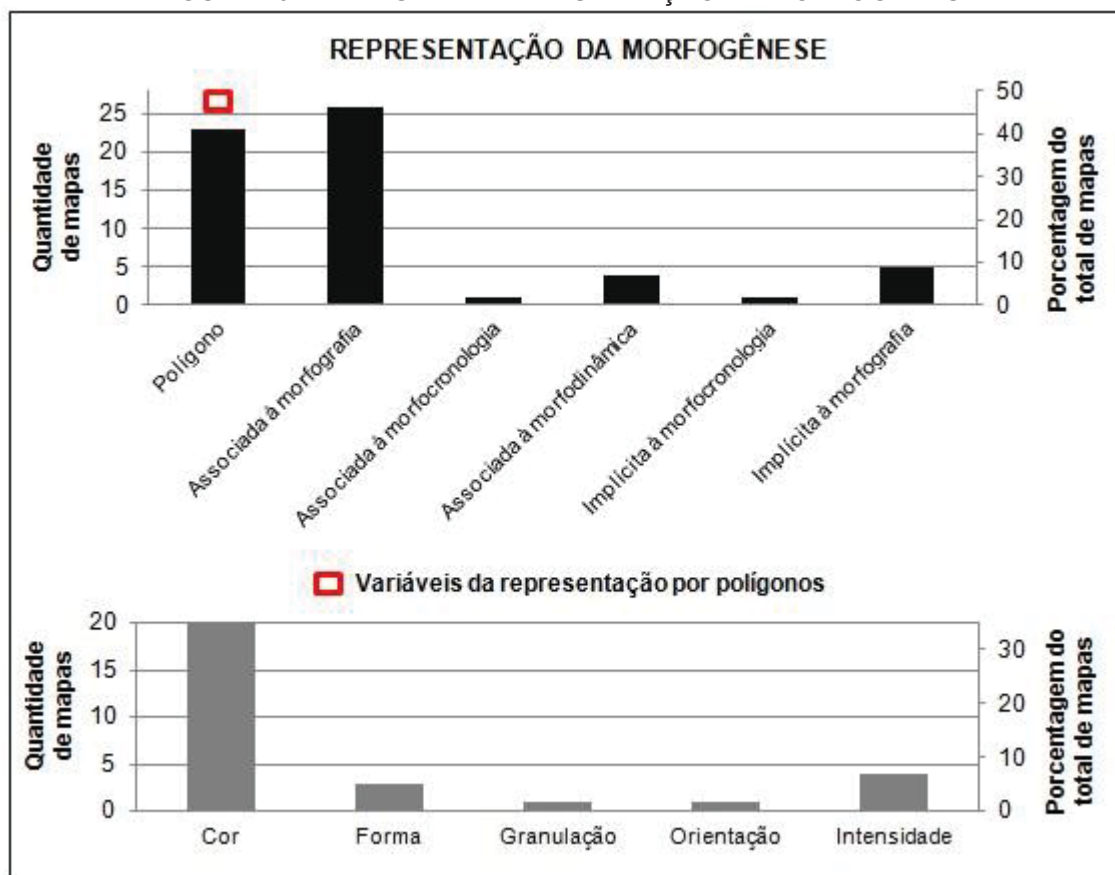
Os outros 59,7% dos mapas simbolizaram a morfogenêse de modo associativo (quando há relação direta) ou implícito (quando há relação indireta) a outros aspectos geomorfológicos, com predomínio da morfografia (45,6%). Conforme constatado, essa associação com a morfografia foi realizada principalmente pela variável cor, seguindo as mesmas recomendações temáticas supracitadas, o que facilita a leitura no mapa. Exemplos são os mapas da Austrália (ANAND e BROEKERT, 2004), Espanha (GARCÍA *et al.*, 2005), Itália (SGN, 1994; AUCELLI *et al.*, 2013) e de Mendoza na Argentina (ABRAHAM, 1996).

Em muitos mapas, no entanto, a morfogênese foi associada à morfografia sem utilização de cores, constando somente na legenda como título ou subtítulo de um agrupamento de feições. Embora tenha sido considerada uma relação associativa, essa forma de representação secundariza a morfogênese, já que inviabiliza a assimilação direta pelo mapa principal e torna necessária a consulta constante à legenda. Dentre os mapas analisados, pode-se citar como exemplos os mapas da região de Prahova na Romênia (GRECU, 2009), região do central do Saara na Líbia (PEREGO *et al.*, 2011), Península de Salento na Itália (FORTE e PENNETTA, 2007) e Rússia (NSU, ?).

Em outros casos, a assimilação da morfogênese depende da interpretação por parte do leitor de aspectos geomorfológicos afins, sendo definida como relação implícita. Para os mapas estaduais, por exemplo, com exceção de São Paulo (que teve representação associativa), todos os demais indicaram implicitamente a morfogênese a partir das unidades morfológicas, cuja descrição genética consta

apenas nos relatórios ou publicações. Já o mapa do Monte Amba Aradam, na Etiópia (COLTORTI *et al.*, 2009), foi o único a apresentar a morfogênese implícita à morfocronologia.

FIGURA 19 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFOGÊNESE



FONTE: o autor (2019)

TABELA 16 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFOGÊNESE

Morfogênese (Representação / Variável)	Abrangência do mapeamento					
	Países		Estados (Brasil)		Regiões	
	Quantidade	%	Quantidade	%	Quantidade	%
Polígono	12	52	0	0	10	35.7
Cor	11	47.8	0	0	10	35.7
Forma	2	8.7	0	0	1	3.6
Granulação	1	4.3	0	0	0	0.0
Orientação	0	0.0	0	0	1	3.6
Intensidade	3	13.0	0	0	1	3.6
Associada à morfografia	10	43.5	1	17	16	57.1
Associada à morfocronologia	1	4.3	0	0	0	0.0
Associada à morfodinâmica	0	0.0	0	0	4	14.3
Implícita à morfocronologia	0	0.0	0	0	1	3.6
Implícita à morfografia	1	4.3	5	83	0	0.0

FONTE: o autor (2019)

Sobremaneira, esses resultados demonstraram que, independentemente da escala ou do ano de publicação, a representação morfogenética foi a mais padronizada dentre os aspectos geomorfológicos analisados individualmente, ainda que muitas divergências tenham sido verificadas. Conforme destaca a TABELA 16, os mapas nacionais (52%) tiveram número maior de representações da morfogênese por polígonos em relação aos mapas de regiões (35,7%), por exemplo.

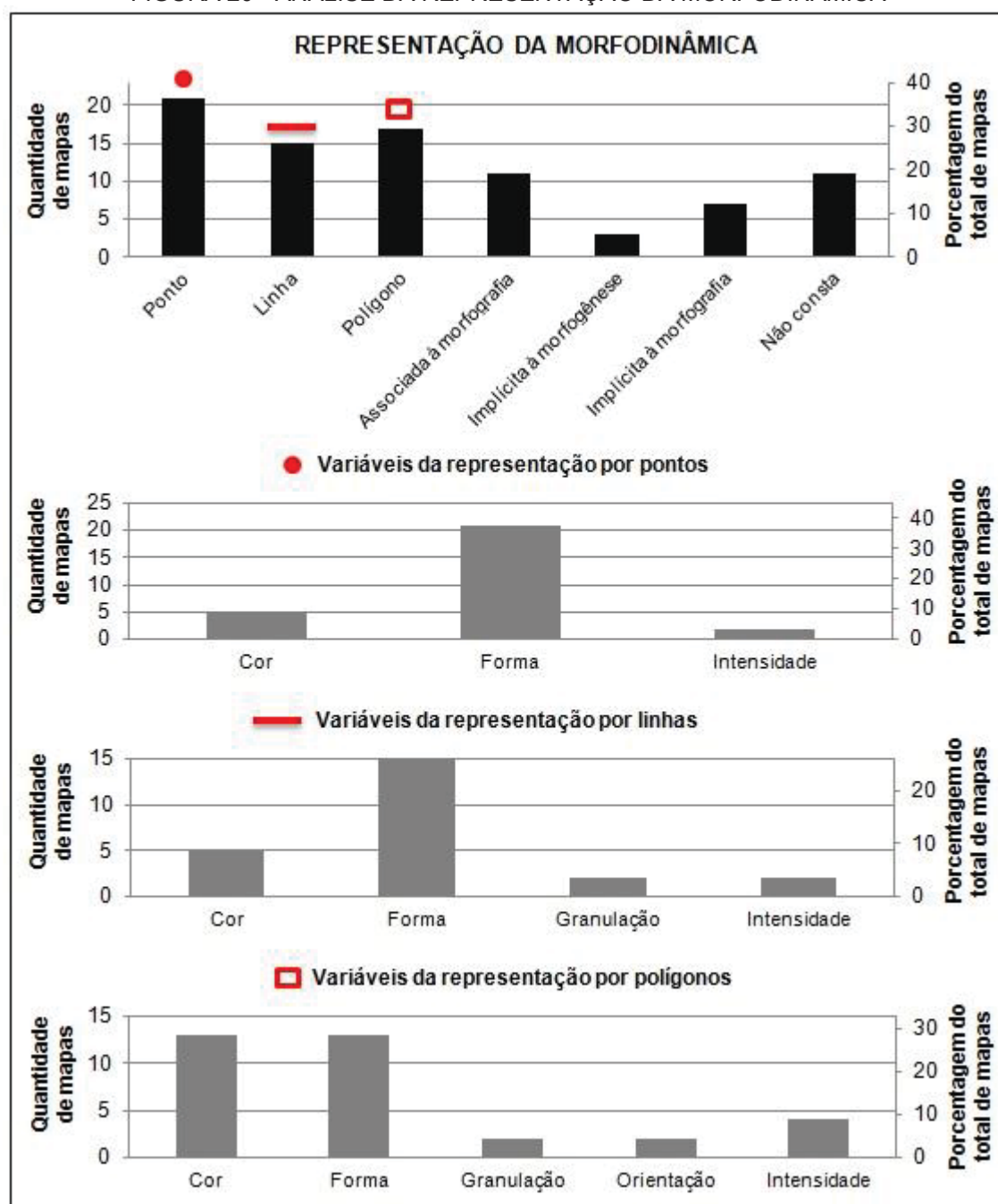
Referente à simbolização da morfodinâmica nos mapas geomorfológicos, destaca-se que 43,9% do conjunto total contém a representação de processos atuantes (seja por pontos, linhas ou polígonos), 36,8% possuem representações associativas ou implícitas e 19,3% não apresentam qualquer indicação morfodinâmica (FIGURA 20). A variável visual mais utilizada foi a forma, sendo representada por pontos em 36,8% dos mapas com símbolos que ilustram feições e processos, muitas vezes categorizados em ativos e inativos e agrupados na legenda de acordo com gênese comum. Apesar da diversidade, foram notadas semelhanças nos símbolos adotados em mapas europeus, como deslizamentos, escarpas erosivas, corridas de detritos e ravinas.

Conforme discutido anteriormente, a inclusão de elementos morfodinâmicos mostrou-se condicionada à escala dos produtos. Assim, mapas de grande escala são favorecidos pelo nível de detalhamento cartográfico que possibilita a espacialização de fenômenos pontuais, enquanto mapas de pequena escala têm o desafio de generalizar tais informações. Isso, somado à complexa dinâmica têmporo-espacial do relevo, ilustrada pela FIGURA 11 da taxonomia de Tricart (1965), se reflete na pluralidade de variáveis empregadas para a caracterização morfodinâmica.

A quantificação individualizada por categoria pela TABELA 17 elucida essa tendência: 21,7% dos mapas nacionais não possuem representação morfodinâmica, enquanto apenas 3,6% dos mapas de regiões registraram ausência de informações relacionadas. Nos mapas estaduais, todos com escala inferior a 1:250.000, novamente São Paulo (ROSS e MOROZ, 1997) foi a exceção, já que os demais não indicaram tal aspecto. Apesar das ponderações em relação à limitação de escala, destaca-se que no contexto geral 5 mapas com escalas inferiores a 1:100.000 possuem representação da morfodinâmica (Alemanha, Croácia, República Tcheca, Mendoza na Argentina, e Península de Salento na Itália) e outros 5 possuem, ao

menos, representação associativa. A escala é, portanto, um fator desfavorável, mas não excludente.

FIGURA 20 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFODINÂMICA



FONTE: o autor (2019)

TABELA 17 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFODINÂMICA

Morfodinâmica (Representação / <i>Variável</i>)	Abrangência do mapeamento					
	Países		Estados (Brasil)		Regiões	
	Quantidade	%	Quantidade	%	Quantidade	%
Ponto	6	26.1	0	0	15	53.6
<i>Cor</i>	2	8.7	0	0	3	10.7
<i>Forma</i>	6	26.1	0	0	15	53.6
<i>Intensidade</i>	1	4.3	0	0	1	3.6
Linha	4	17.4	0	0	11	39.3
<i>Cor</i>	1	4.3	0	0	4	14.3
<i>Forma</i>	4	17.4	0	0	11	39.3
<i>Granulação</i>	1	4.3	0	0	1	3.6
<i>Intensidade</i>	1	4.3	0	0	0	0
Polígono	5	21.7	1	17	12	42.9
<i>Cor</i>	5	21.7	0	0	7	25.0
<i>Forma</i>	3	13.0	1	17	9	32.1
<i>Granulação</i>	1	4.3	0	0	1	4
<i>Orientação</i>	1	4.3	0	0	1	4
<i>Intensidade</i>	2	8.7	0	0	1	3.6
Associada à morfografia	7	30.4	0	0	4	14.3
Implícita à morfogênese	1	4.3	0	0	0	0
Implícita à morfografia	3	13.0	0	0	2	7.1
Não consta	5	21.7	5	83	1	3.6

FONTE: o autor (2019)

O último aspecto geomorfológico analisado, morfocronologia, foi o de menor representatividade explicitada diretamente nos mapas, com 12,3% do total. Embora a morfodinâmica tenha registrado uma ausência maior, de 19,2% contra 17,5% da morfocronologia, o diferencial está nas representações associativas ou implícitas, que contabilizaram 70,1% (FIGURA 21). Esse resultado é justificado em função das notórias dificuldades de se atribuir idades, sejam absolutas ou relativas, às formas de relevo e sua consequente representação associada aos outros elementos constituintes de um mapa geomorfológico.

Na maioria dos mapas analisados a morfocronologia aparece de modo implícito, sendo necessário o conhecimento geomorfológico prévio para inferir relações temporais, o que torna a análise cronológica (ainda mais) subjetiva e imprecisa. Em 21% dos mapas a morfocronologia foi implicitamente vinculada à geologia, principalmente às unidades litológicas, o que pode causar interpretação dúbia acerca da idade das formações rochosas e das formas de relevo, como apresentado no mapa do Parque Nacional Lagonegrese, na Itália (GIANO, 2016), da Serra do Montejunto, em Portugal (FONSECA, 2011), e da Alta Ribagorza, na Espanha (CÍA e ANDRÉS, 2008).

A representação implícita à morfogênese e morfografia, que constaram em 14% mapas, embora também evoquem interpretações dedutivas por parte do leitor ao menos não causam confusão cronológica com a idade do substrato. Essa associação se demonstrou facilitada pela atribuição qualitativa na legenda, ou seja, quando a morfocronologia aparece implícita às adjetivações de unidades morfográficas ou morfogenéticas. O mapa da Península de Juan Mazía, no Chile (MURO *et al.*, 2015), por exemplo, apresenta na legenda a diferenciação de terraços marinhos em primeira, segunda, terceira e quarta ordem, o que caracteriza uma relação implícita à cronologia relativa.

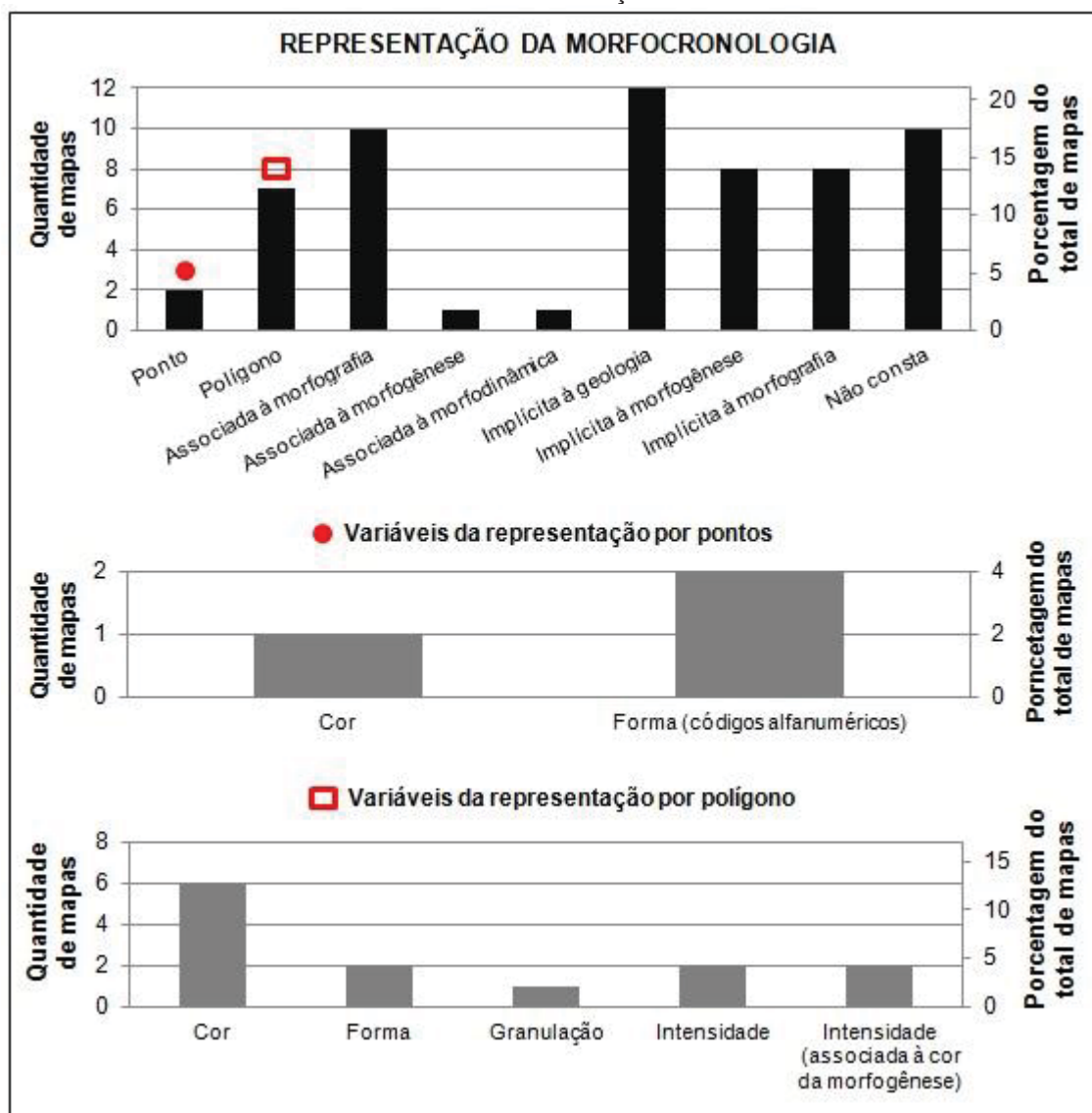
Mesmo para os mapas que representaram a morfocronologia com pontos ou polígonos, ainda sim foi verificada associação direta com a morfografia ou morfogênese. Exemplo é o mapa do Equador (ALMEIDA *et al.*, 1974), cujos polígonos com variação de cor, forma ou intensidade são compartilhados à representação de unidades de sistemas morfogenéticos. Essas constatações reafirmam o caráter dependente da indicação cronológica do relevo nos produtos cartográficos.

A análise categorizada, segundo a TABELA 18, apontou a semelhança entre a quantificação para mapas nacionais e de regiões, com divergência significativa somente para a classe "implícita à geologia", que foi três vezes maior para os mapas de regiões. Os estaduais, mais uma vez, demonstraram divergência com o conjunto externo e padronização interna: todos os cinco mapas evidenciaram a morfocronologia implícita à morfografia, onde a interpretação regional da cronologia aparece somente nos relatórios descritivos à parte.

Do conjunto total de mapas, algumas propostas de representação morfocronológica obtiveram destaque: no mapa da República Tcheca (DEMEK *et al.*, 2009), a cronologia foi atribuída, na legenda, para todos os objetos morfográficos, morfogenéticos ou morfodinâmicos ("T" para terciário, "H" para holoceno e "Q" para quaternário); no mapa holandês (KOOMEN e MAAS, 2004), a indicação da idade foi vinculada às próprias unidades morfológicas em extensa legenda acoplada ao mapa principal; no mapa russo da bacia de Pechora (NIKOLSKAYA *et al.*, 2002) foram atribuídas ordens, em níveis ou gerações, para morainas, terraços e cristas glaciectônicas, utilizando-se de polígonos com variação de cor; por fim, no mapa das Montanhas Dumitor em Montenegro (ANNYS

et al., 2014) foram incluídas datações de morainas representativas distribuídas pela área de estudo.

FIGURA 21 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFOCRONOLOGIA



FONTE: o autor (2019)

Além dos aspectos geomorfológicos, foram analisados os elementos acessórios presentes nos mapas, à parte da representação principal, compreendidos como informações adicionais. Conforme quantificação apresentada pela FIGURA 22, 26,3% dos documentos consultados não possuem quaisquer elementos complementares, enquanto a geologia foi evidenciada em quase metade (49,1%) dos mapas, o que denota a importância dada às formações rochosas como fato essencial para a interpretação do relevo. Cabe destacar que muitos mapas incluíram a litologia como tópico do próprio mapa principal, o que eleva consideravelmente

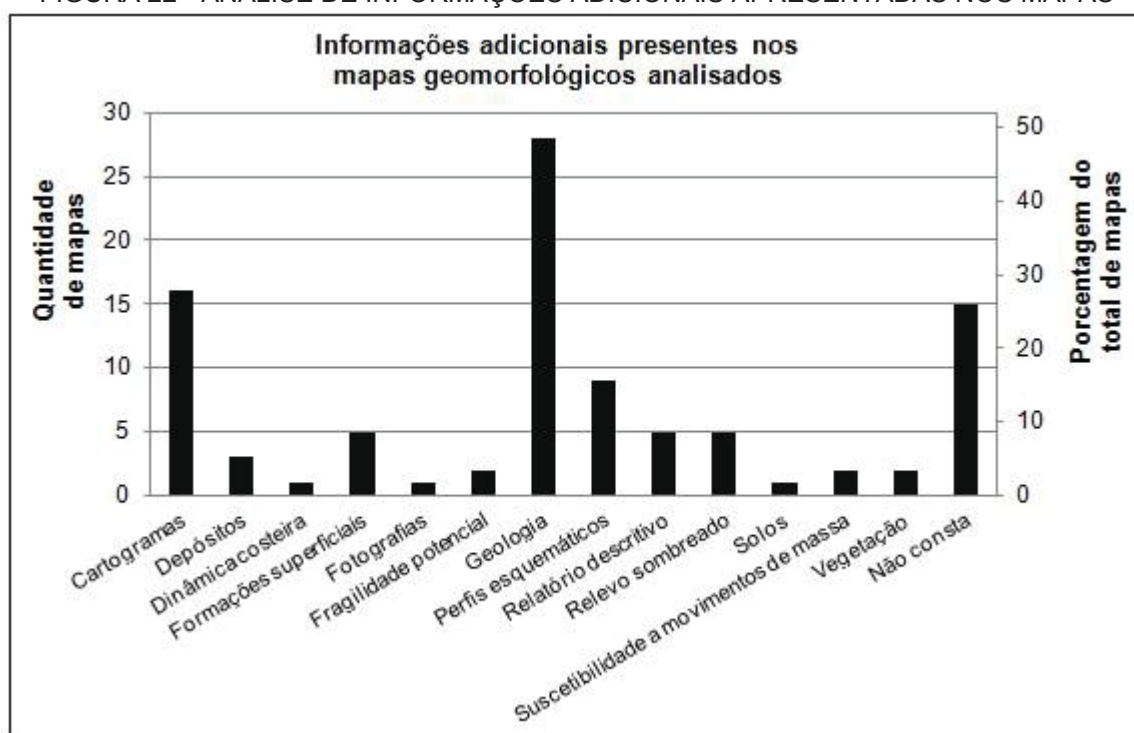
esse percentual. Dois mapas de regiões, aliás, apresentaram a litologia como aspecto de ênfase: região da Basilicata, na Itália (BENTIVENGA *et al.*, 2015), e Alta Ribagorza, na Espanha (CÍA e ANDRÉS, 2008).

TABELA 18 - ANÁLISE DA REPRESENTAÇÃO DA MORFOCRONOLOGIA

Morfocronologia (Representação / <i>Variável</i>)	Abrangência do mapeamento					
	Países		Estados (Brasil)		Regiões	
	Quantidade	%	Quantidade	%	Quantidade	%
Ponto	1	4.3	0	0	1	3.6
<i>Cor</i>	1	4.3	0	0	0	0.0
<i>Forma</i>	1	4.3	0	0	1	3.6
Polígono	3	13.0	0	0	4	14.3
<i>Cor</i>	2	8.7	0	0	4	14.3
<i>Forma</i>	0	0.0	0	0	2	7.1
<i>Granulação</i>	0	0.0	0	0	1	4
<i>Intensidade</i>	3	13.0	0	0	1	3.6
Associada à morfografia	7	30.4	0	0	3	10.7
Associada à morfogênese	1	4.3	0	0	0	0.0
Associada à morfodinâmica	0	0.0	0	0	1	3.6
Implícita à geologia	3	13.0	0	0	9	32.1
Implícita à morfogênese	4	17.4	0	0	3	10.7
Implícita à morfografia	0	0.0	6	100	1	3.6
Não consta	4	17.4	0	0	6	21.4

FONTE: o autor (2019)

FIGURA 22 - ANÁLISE DE INFORMAÇÕES ADICIONAIS APRESENTADAS NOS MAPAS



FONTE: o autor (2019)

O segundo elemento de maior evidência destacada foi a inserção de cartogramas temáticos (28%). A análise permitiu avaliar que os cartogramas despontam como solução para a inclusão de informações quando o mapa principal contabiliza número excessivo de objetos cartografados, o que dificulta a leitura do produto. Nesse quesito, o mapeamento italiano (SGN, 1994) foi o que apresentou maior número e variedade de informações, contemplando geologia, declividade, modelos de relevo sombreado em perspectiva 3D, unidades morfológicas generalizadas e dados climáticos. Outro elemento que se destacou foram os perfis esquemáticos, com 15,7%, que trazem uma perspectiva em duas dimensões e possibilitam correlação visual ilustrativa entre as formas, o substrato e, em alguns casos, de níveis de paleosuperfícies: Austrália (ANAND e BROEKERT, 2004) e Espanha (GARCÍA e CERDÁN, 2006).

Quanto à análise das variáveis visuais de Bertin (1967) (FIGURA 6) empregadas nos mapas geomorfológicos, em termos gerais, destaca-se que as mais utilizadas foram as cores e as formas, constando na maioria dos mapas conjuntamente: cores para distinguir morfogênese e formas para simbolizar feições e processos, por exemplo. A terceira variável visual de maior aplicação foi a intensidade, principalmente como critério de subdivisão para agrupamentos de determinado aspecto geomorfológico, já que possui a propriedade de ordenação. Na sequência, verificou-se que as variáveis orientação e granulação foram utilizadas de modo secundário às cores, formas e intensidades e também de modo auxiliar (sobrepostas). Por fim, constatou-se que a variável tamanho foi a de menor representatividade dentre todas as analisadas, contando em apenas três mapas.

Os resultados apresentados auxiliaram na escolha das variáveis, dos objetos, dos símbolos e dos modos de organização e representação para a construção do mapa geomorfológico do presente trabalho. A análise detalhada, temática e geomorfológica, permitiu selecionar elementos individuais que obtiveram destaque nos produtos cartográficos consultados para compor o mapa produzido para o estado do Paraná.

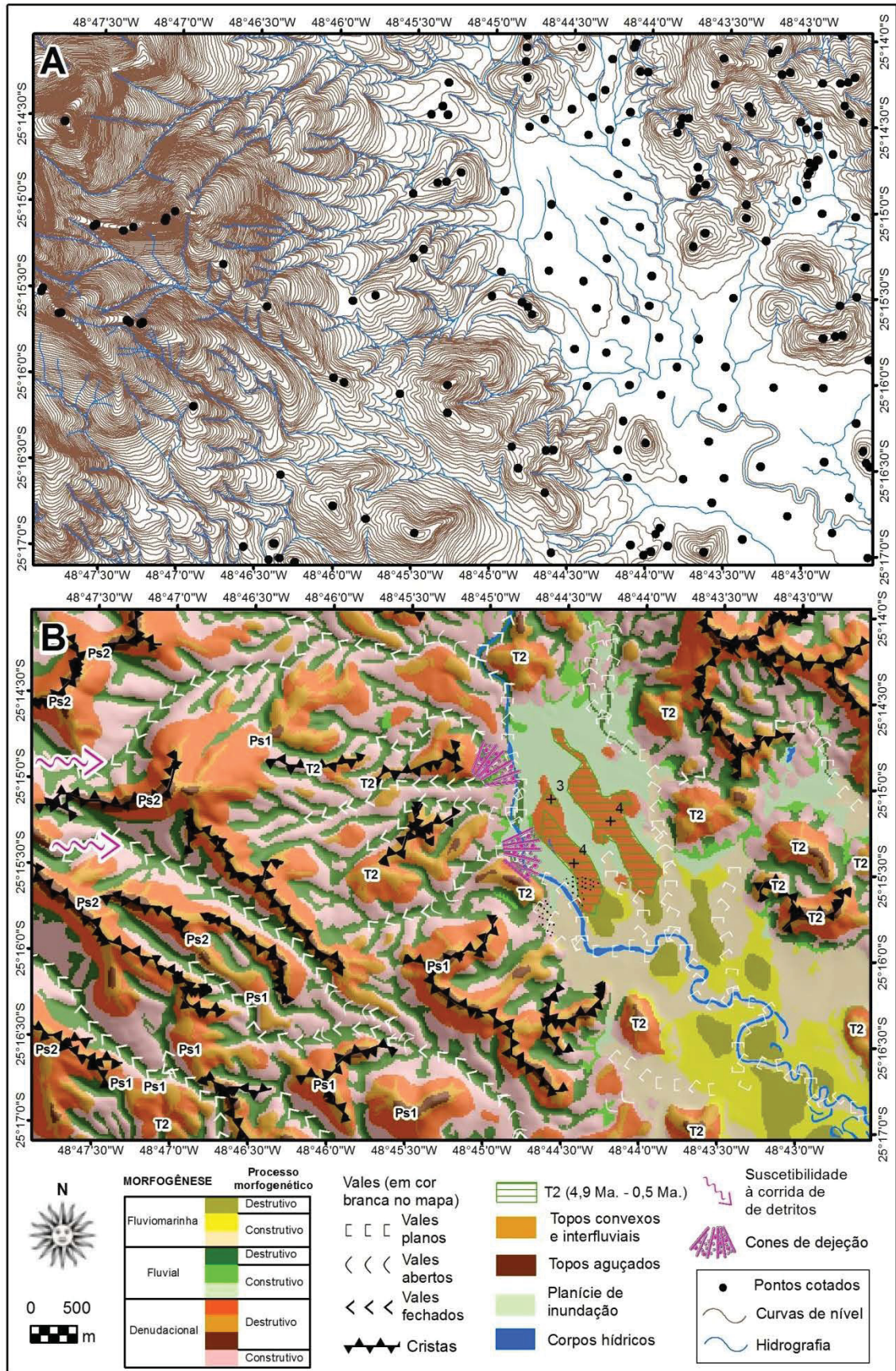
4.2 MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO

A FIGURA 23 exemplifica, num pequeno recorte, os resultados obtidos na tese, com a proposta de mapear o relevo utilizando critérios exclusivamente morfométricos a partir de uma base planialtimétrica com pontos cotados, curvas de nível e hidrografia (A) e, a partir disso, sistematizar critérios classificatórios com base na modelagem digital para representar os aspectos geomorfológicos elementares (B) de modo padronizado para todo o estado do Paraná.

A representação cartográfica enfatizou a morfogênese e morfografia. Quanto às variáveis visuais temáticas, cada aspecto geomorfológico foi representado da seguinte maneira: i) morfometria: pontos (pontos cotados e formas), linhas (curvas de nível) e cartogramas adicionais; ii) morfografia: pontos (forma e tamanho), linhas (forma) e polígonos (cor e orientação); iii) morfogênese: polígonos (cor, intensidade e orientação); iv) morfodinâmica: pontos (forma e tamanho) e cartogramas adicionais; v) morfocronologia: pontos (indicação textual), polígonos (cor e orientação) e perfis topográficos adicionais.

A aplicação da proposta metodológica abrangeu todo o estado do Paraná (199315 km²). Para fins ilustrativos, foram organizados 8 mapas de porções geomorfológicas representativas do estado adequados à escala 1:50.000: Carta Paranaguá (APÊNDICE 1), no contato entre a Planície Litorânea e Serra do Mar; Carta Represa do Capivari (APÊNDICE 2), que traz a representação do conjunto do Pico Paraná e o reserso da Serra do Mar, na região do Ribeira, já no Primeiro Planalto; Carta Curitiba (APÊNDICE 3), integralmente no Primeiro Planalto, que contempla a bacia hidrográfica do rio Ribeira, a norte, e bacia hidrográfica do rio Iguaçu, a sul; Carta Campo Largo (APÊNDICE 4), no contato entre o Primeiro e Segundo Planalto, com destaque para a escarpa que marca o início da bacia sedimentar do Paraná; Carta União da Vitória (APÊNDICE 5), na transição do Segundo para o Terceiro Planalto; Carta Itapara (APÊNDICE 6), na transição entre o Segundo e Terceiro Planalto, na Serra da Esperança; Carta Borrazópolis (APÊNDICE 7), no eixo central do Arco de Ponta Grossa no Terceiro Planalto; Carta Guairaçá (APÊNDICE 8), na região noroeste do estado do Paraná.

FIGURA 23 - EXEMPLO DOS RESULTADOS DA MODELAGEM



FONTE: o autor (2019)

4.2.1 Planície Litorânea

De todas as grandes unidades geomorfológicas do estado do Paraná, a Planície Litorânea é caracterizada por apresentar baixa densidade de curvas de nível, conforme ilustra a FIGURA 23 (a sudeste). Por esse motivo, supôs-se, inicialmente, que as etapas de modelagem geomorfométrica seriam prejudicadas em função da generalização associada à equidistância de 10 metros para uma extensa planície. Entretanto, a conferência em campo dos itens geomorfológicos mapeados demonstrou que os pontos cotados e principalmente a hidrografia, com base no interpolador *Topogrid* (HUTCHINSON, 1989), foram determinantes para que o MDT derivado tenha permitido, de modo condizente à realidade, suprir a escassez de curvas de nível na representação de objetos discretos. A verificação em campo totalizou 20 pontos de análise e 200 km percorridos com acompanhamento em tempo real.

O efeito escavado que as feições lineares de hidrografia conferiram ao MDT propiciou identificar: i) pequenas rupturas de declive, cujos segmentos convexos contínuos, em perfil de curvatura, foram definidos como bordas de terraços fluviomarinhos; ii) porções mais rebaixadas, interpretadas como planícies de inundação; iii) vales dos rios da planície fluviomarinha. Além dessas feições morfológicas, a hidrografia como dado de entrada 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, de Angulo (2004), que constituem áreas alagadas em depressões rasas, estreitas e alongadas.

Embora os terraços fluviomarinhos tenham sido representados por uma única classe, já que os atributos geomorfométricos utilizados não possibilitaram criar uma regra de classificação para distingui-los, sua ocorrência na área de estudo pode ser dividida em: i) terraços de predomínio fluvial, expostos após a incisão da drenagem sobre cordões litorâneos e depressões intercordões; ii) terraços de predomínio marinho, vinculados sobretudo às dunas frontais ou cordões litorâneos mais recentes. No primeiro caso, conforme supramencionado, a hidrografia como dado de entrada foi determinante para a modelagem. Assim, no mapa resultante, as bordas dos terraços com essa característica ficam destacadas paralelamente aos

vales planos dos rios da planície. No segundo caso, a linha de costa como cota hipsométrica zero e os pontos cotados próximos à face da praia auxiliaram na identificação das rupturas convexas. Essa distinção aparece evidenciada em trabalho de Oka-Fiori *et al.* (1996), que caracterizou as planícies aluviais e de restinga.

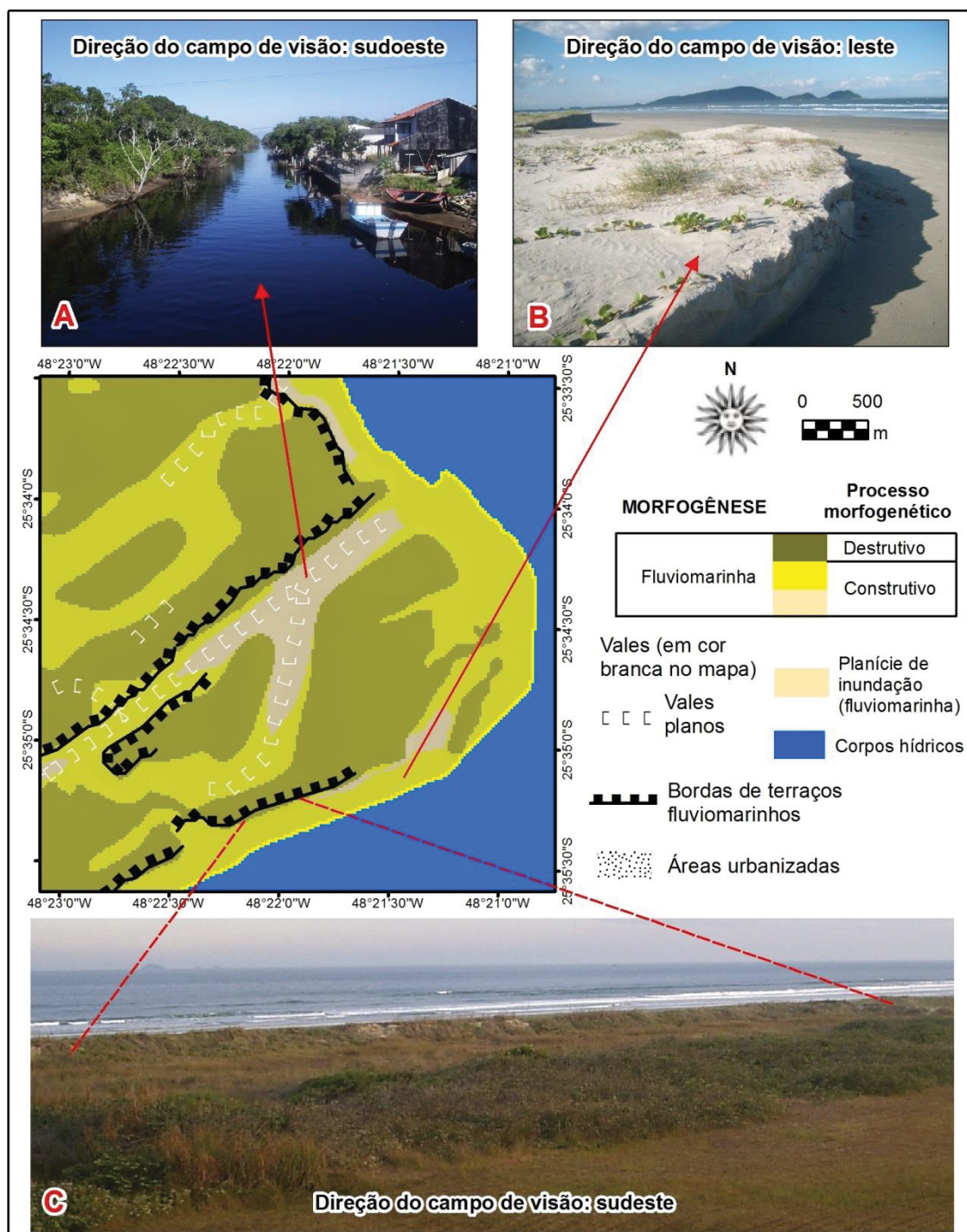
A FIGURA 24C exemplifica uma borda de terraço mapeado, de influência marinha, e sua representação na paisagem. Além disso, evidencia um caso da complexa dinâmica costeira no município de Pontal do Paraná, em que o terraço fluviomarinho em destaque (Balneário Atami) está a 250 metros da linha de costa, enquanto nas demais praias do estado essa distância média foi de 50 metros. Isso se deve, conforme descrito por Soares *et al.* (1994) e Angulo *et al.* (2006), às variações da linha de costa registradas nas últimas décadas nessa porção. A abertura de um canal artificial na década de 1960 (disposto pela FIGURA 24A) alterou a dinâmica do transporte sedimentar da corrente de deriva litorânea (de sul para norte), barrando os sedimentos na foz do canal, atual porto de embarque para a Ilha do Mel. Soma-se a isso o fato da área estar localizada na desembocadura sul do Complexo Estuarino da Baía de Paranaguá, submetida aos efeitos do delta de maré vazante. Como consequência, houve deposição a sudeste e erosão a noroeste do canal, seguindo a linha de costa.

A deposição resultou em taxas de progradação superiores a 300 metros entre 1980 e 1997, conforme Soares *et al.* (1994) e Noernberg (2001), o que justifica a distância entre a borda do terraço e a linha de costa. Destaca-se que apesar da grande variação do balanço sedimentar na área desde então, inclusive com saldos distintos durante as estações do ano (a FIGURA 24B exemplifica um comportamento erosivo após passagem de frente fria, no inverno), o padrão agradacional foi predominante nas últimas décadas e, por esse motivo, a área foi corretamente mapeada como processo morfogenético construtivo (comprovado, *in loco*, pelo avanço gradativo da vegetação de restinga). O caso de Pontal do Paraná pode ser aplicado aos demais municípios litorâneos, pois o mapeamento resultante demonstrou que os terraços próximos à linha de costa são indicadores do balanço sedimentar local e do consequente padrão erosivo ou deposicional. Ao todo, foram mapeados 582 km de bordas de terraços fluviomarinhos.

Outros três exemplos com resultados satisfatórios verificados em campo merecem destaque: i) possibilidade de interpretação dos estágios evolutivos da Ilha

do Mel e Superagui a partir dos terraços e classes morfogênicas; ii) indicação de erosão costeira, sobretudo na porção centro-sul do arco praial (município de Matinhos), em praias que apresentam processo morfogênico destrutivo próximos à costa; iii) representação condizente à realidade nas porções estuarinas e na abrupta transição de relevo com a Serra do Mar, como mostra o mapa do APÊNDICE 1.

FIGURA 24 - MAPEAMENTO EM PONTAL DO PARANÁ



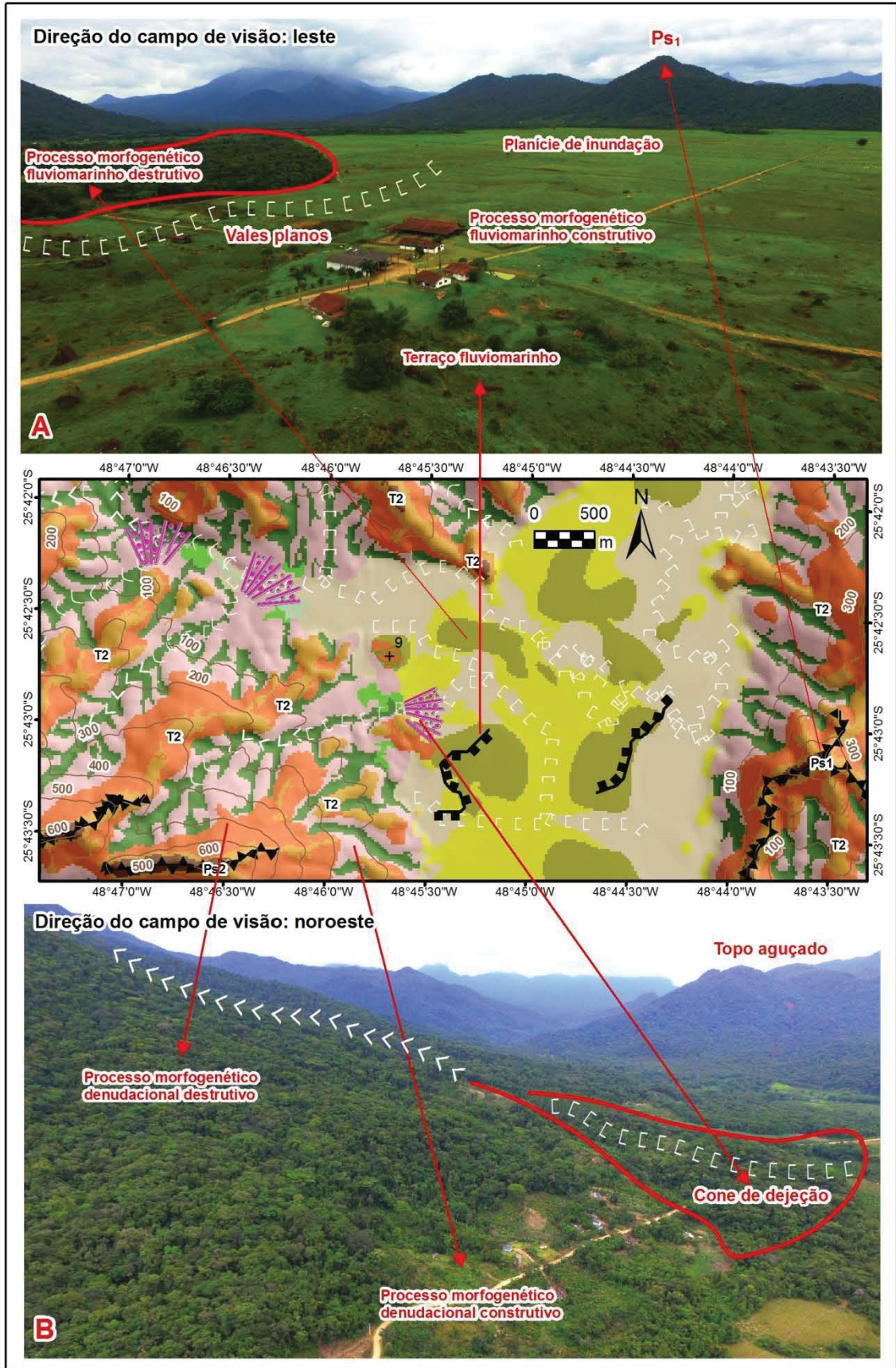
FONTE: o autor (2019)

Quanto às planícies de inundação mapeadas, verificaram-se três características distintas: i) planícies de inundação com influência de marés, próximas à costa, com exemplo evidenciado pela FIGURA 24A, onde a combinação de maré meteorológica e astronômica torna a área suscetível a inundações eventuais; ii) planícies de inundação dos rios continente adentro, afastados da Serra do Mar, em porções mais rebaixadas dos cursos fluviais, como demonstrado pelo mapa da folha Paranaguá no APÊNDICE 1; iii) planícies de inundação no sopé da Serra do Mar, destacadas pelo gradiente altimétrico e ruptura de declividade com a Planície Litorânea, cuja quebra de relevo favorece o extravasamento do fluxo acumulado dos rios para as áreas marginais, conforme ilustra a FIGURA 23, 25, 26 e 27. Os resultados apontaram que o limiar de 2 metros utilizado no atributo BTH foi eficiente para a identificação dos leitos maiores, já que os baixos valores de declividade calculados para toda a planície não permitiram, por si só, distinguir feições específicas.

A FIGURA 25A expõe o mencionado contato entre a Planície Litorânea e a Serra do Mar, no município de Guaratuba, cuja planície em destaque encontra-se confinada entre as elevações da Serra da Prata. A vinculação dos objetos mapeados com a fotografia demonstra que a própria vegetação e uso do solo auxiliam na interpretação do relevo local. As porções de maior elevação da planície, classificadas como processo morfogenético fluviomarinho destrutivo e normalmente circundadas por terraços fluviomarinhos, apresentam vegetação arbórea, mesmo que esparsa. As porções caracterizadas como construtivas compreendem, na fotografia, áreas de plantio de arroz, nas quais o cultivo é realizado em áreas úmidas. Ressalta-se, também, o mapeamento adequado das planícies de inundação em relação à localização dos rios.

Muitas dessas planícies de inundação mapeadas no sopé da Serra do Mar estão associadas a sistemas de cones de dejeção de detritos, como mostra a FIGURA 25B, 26 e 27. Cabe destacar que o mapa geomorfológico da *Folha SG.22 Curitiba* (COSTA *et al.*, 2005) do Projeto RADAMBRASIL (BARBOSA *et al.*, 1984), cartografou todas as planícies confinadas nos grandes vales da Serra do Mar (figuras supramencionadas) como "Planícies Alúvio-Coluvionares", na categoria "Rampas de colúvio", caracterizando-as como modelado de acumulação, em áreas planas ou embaciadas, resultante da convergência de leques coluviais, cones de

FIGURA 25 - PLANÍCIE FLUVIOMARINHA E SOPÉS DA SERRA DO MAR



FONTE: o autor (2019)

dejeção ou da concentração de depósitos de enxurradas nas partes terminais da rampa de pedimentos. O mapa de mais detalhe resultante do zoneamento do litoral paranaense, realizado pelo IPARDES (1989), classifica essas porções como "Áreas colúvias", e o mapa geológico do estado do Paraná (MINEROPAR, 2001) como "Aluviões recentes".

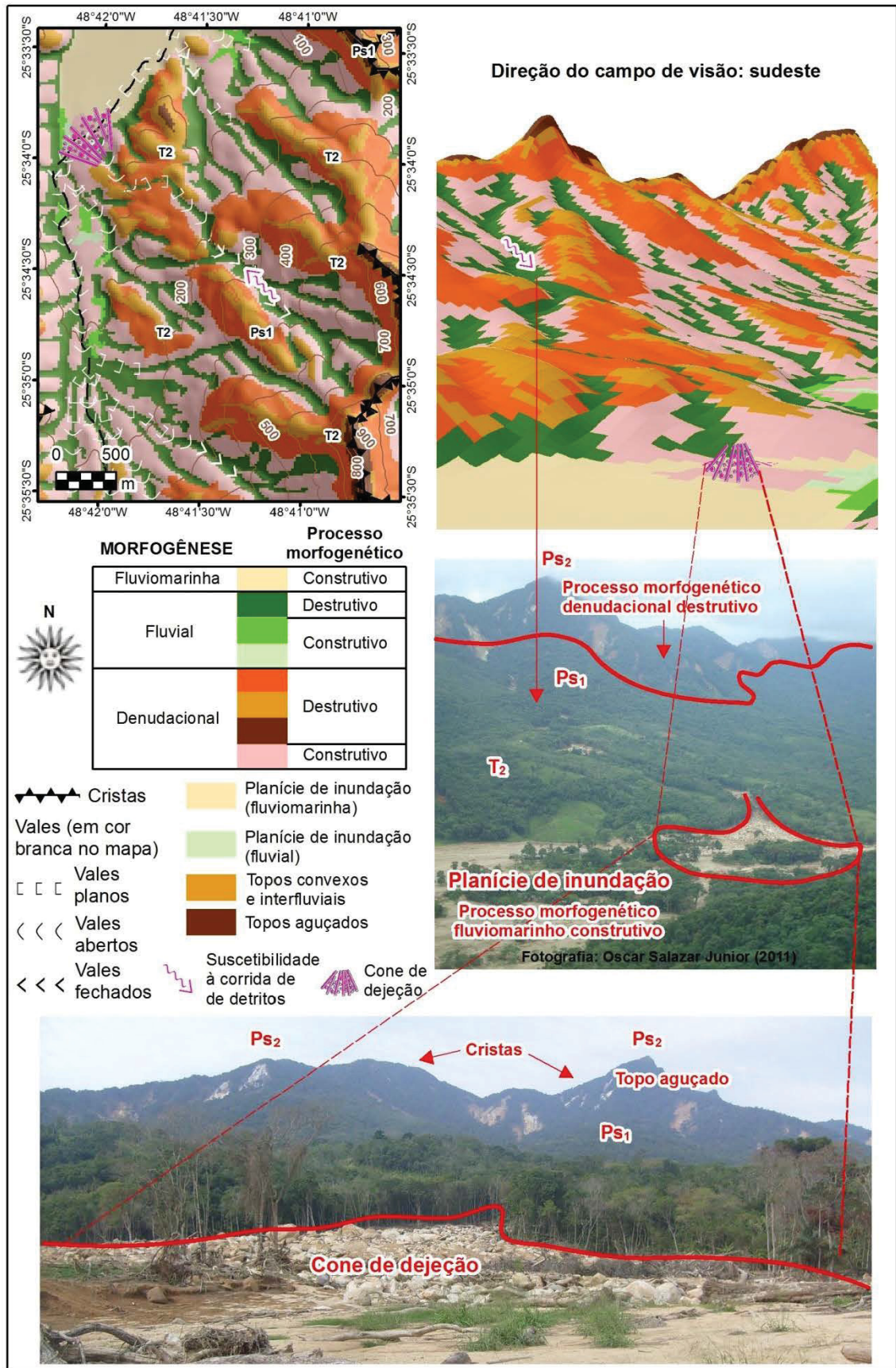
E, de fato, o presente mapeamento indicou que 20% dos cones de dejeção modelados no estado do Paraná na categoria de "grandes" (ou seja, com amplitude superior a 200 metros na regra de classificação), encontram-se dentro das unidades referente às rampas de colúvio do mapeamento do RADAMBRASIL. Complementarmente, o sopé da Serra do Mar também foi a área de maior densidade de cones de dejeção mapeados. Nesse caso, a concentração de feições pontuais características validam as unidades homogêneas delimitadas por mapeamentos de escala mais generalizada.

A FIGURA 26 traz um exemplo de evento recente que evidencia a relação entre os processos erosivos da Serra do Mar e a formação da Planície Litorânea, na qual o aporte sedimentar é destacado pelos cones de dejeção e planícies de inundação. Nesse evento, na bacia do rio Jacareí, caracterizado como um conjunto de escorregamentos cujo material desprendido foi transportado pelos vales na forma de corridas de detritos (SILVEIRA *et al.*, 2013; SILVEIRA *et al.*, 2014), observações *in loco* contabilizaram até 70 centímetros de espessura de material depositado na planície em função desse único evento ocorrido em 2011. A discussão detalhada do caso ilustrado encontra-se apresentada na seção 4.2.2 (Serra do Mar).

Os resultados obtidos pela modelagem condizem com a interpretação realizada por Silveira *et al.* (2014) no mesmo recorte. Segundo os autores, referindo-se à planície, "o material mais grosso depositou-se na desembocadura dos canais na forma de cones de detritos, enquanto que o material lenhoso e os sedimentos finos atingiram grandes extensões na planície na forma de corridas de lama" (p. 4). Salienta-se, ainda em relação à FIGURA 26, que além do ponto do cone de dejeção ter sido modelado com exatidão, constando na planície fluviomarina, a área próxima a ele foi mapeada como processo morfogenético denudacional construtivo, ou seja, destacando também os depósitos de colúvios.

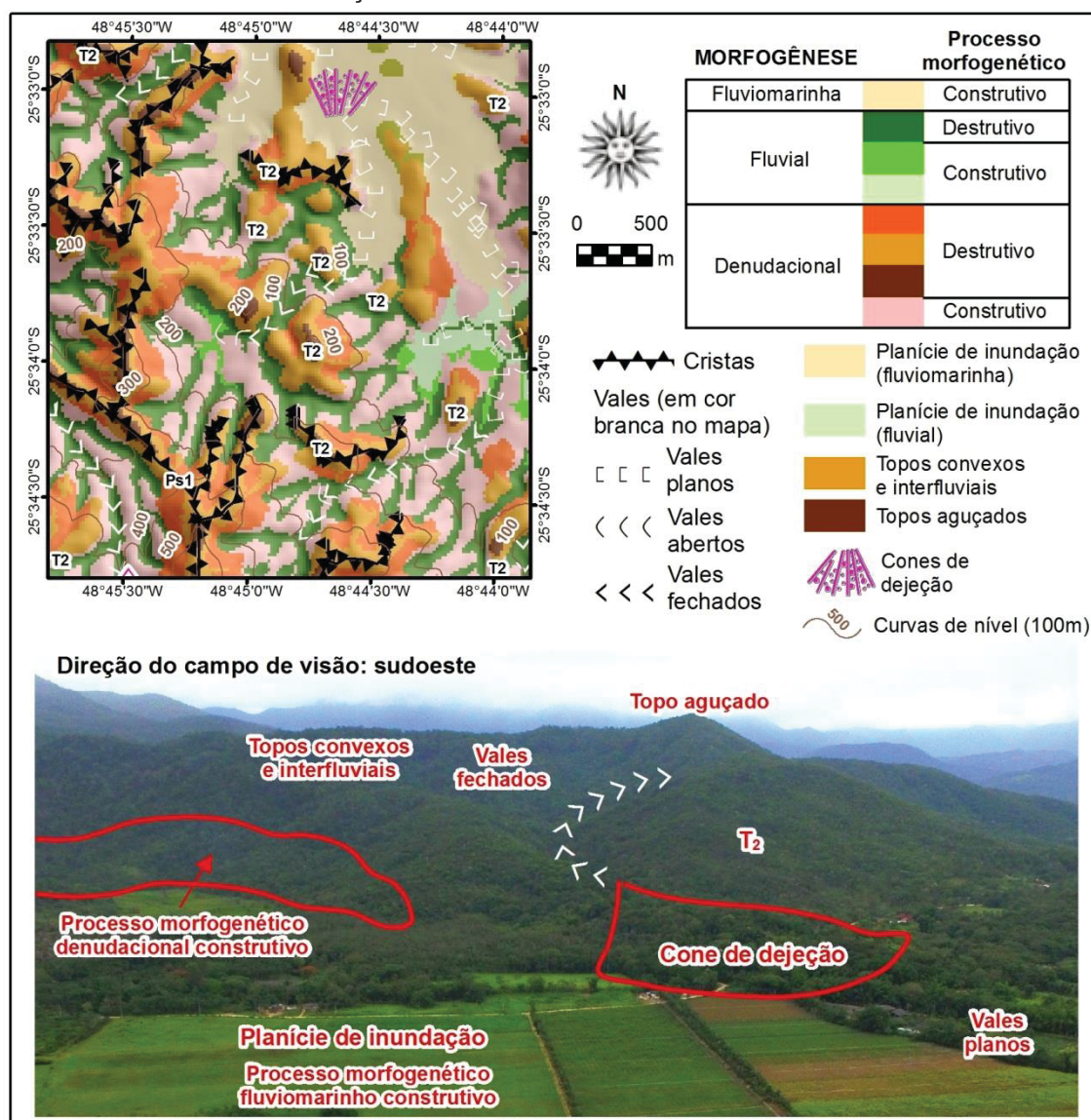
Os exemplos de cones de dejeção mostrados pela FIGURA 25 e 27 indicam a feição característica de cones de ambientes agradacionais, ainda que sem evidências da ocorrência de grandes eventos erosivos recentes, associada a

FIGURA 26 - MAPEAMENTO NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO JACAREÍ



FONTE: o autor (2019)

FIGURA 27 - TRANSIÇÃO ENTRE PLANÍCIE LITORÂNEA E SERRA DO MAR



FONTE: o autor (2019)

pronunciadas planícies de inundação com os típicos vales planos. Tanto para os casos pontuados quanto para os demais observados em campo, destaca-se o êxito das regras de classificação geomorfométrica empregadas para mapeamento dos cones de dejeção, com exatidão locacional, e também das planícies de inundação, com limites fidedignos.

As áreas de deposição, na transição com a Serra do Mar, foram as únicas na Planície Litorânea em que foram mapeados vales abertos ou, eventualmente, vales fechados. Os demais segmentos foram modelados, em sua totalidade, corretamente como vales planos. Isso demonstra que a regra de classificação tendo área de contribuição e BTH como parâmetros obteve êxito mesmo em áreas com

pouca variação altimétrica. O mapa do APÊNDICE 1 permite uma visão abrangente do fato mencionado.

Quanto aos morros isolados presentes na Planície Litorânea, definidos pelo mapa geomorfológico do Paraná na escala 1:250.000 (SANTOS *et al.*, 2006) como unidade de "Rampas de pré-serra e serras isoladas", o presente mapeamento os classificou como feições de gênese denudacional, nas porções de fluxo divergente, e gênese fluvial, nas porções convergentes, subdivididos entre predomínio de processos destrutivos, nos topos, e construtivos, nas bases. Os morros mais aguçados indicaram as linhas de cristas, modeladas em rochas da Suíte Álcali-Granitos e do Complexo Gnáissico Migmatítico do Proterozoico Inferior (MINEROPAR, 2001). Também foram classificadas muitas feições com topos convexos, associadas a colinas de menor amplitude altimétrica.

Todos os topos foram mapeados como T₂, ou seja, possuem no mínimo 500 mil anos (podendo variar até 5 milhões de anos, cronologia da paleosuperfície de nível superior). A partir da premissa que esses topos testemunham níveis de paleosuperfícies, a cronologia obtida pela modelagem é corroborada pela publicação de Angulo (2004), onde o autor atribui a formação da planície litorânea aos dois últimos ciclos transgressivo/regressivos do Quaternário, relacionados aos ciclos glaciais.

Por fim, ressalta-se que a gênese fluviomarinha, embora tenha representado apenas 1% da área total do estado, foi mapeada com grande variedade de feições e processos. Compreende, portanto, uma região de morfodinâmica ativa e instável.

4.2.2 Serra do Mar

De modo oposto à Planície Litorânea, a região que compreende a Serra do Mar foi a que apresentou os maiores contrastes morfométricos de todo o estado. Como consequência, a classificação resultante foi notabilizada pela variedade de objetos mapeados, sejam morfográficos, morfogenéticos, morfodinâmicos ou morfocronológicos, como ilustra a FIGURA 23, 25, 26, 27, 28, 31 e 34. As etapas de campo contabilizaram 24 pontos de análise e 140 km percorridos com acompanhamento em tempo real.

As classes de morfogênese destacaram a segmentação entre a origem denudacional e fluvial do relevo, com algumas áreas mapeadas como gênese fluviomarinha nos sopés da Serra do Mar. A FIGURA 31 e 34, que indicam a Serra do Marumbi, ilustram essas três classes numa perspectiva tridimensional. Cabe destacar que o caráter morfogenético, na presente tese, foi compreendido numa escala têmporo-espacial mais recente, o que possibilitou a subdivisão entre processos morfogenéticos de predomínio construtivo ou destrutivo que caracterizam o modelado atual. Portanto, mesmo compreendendo que de modo mais abrangente, enquanto unidade homogênea, a Serra do Mar possui origem vinculada à tectônica do *rift* continental de idade paleocênica (ALMEIDA e CARNEIRO, 1998), o mapeamento obtido permitiu detalhar a constituição e evolução genética do relevo, cujos testemunhos morfocronológicos foram expostos pela idade modelada nos topos.

As porções de gênese fluvial evidenciaram o padrão de dissecação do relevo na região serrana, onde o desnível e a acentuada declividade (média de 34%) conferem densidade de incisões fluviais com vales escavados. Como consequência, 85% das áreas de gênese fluvial foram mapeadas como processo morfogenético destrutivo, evidenciadas médios das vertentes, enquanto os 15% de área com processo construtivo concentraram-se sobretudo nos terços inferiores. O mesmo padrão foi observado para a gênese denudacional, na qual os topos e áreas adjacentes contemplaram processo morfogenético destrutivo e as porções imediatamente inferiores, que dispõem de material coluvionar, por processo construtivo.

Nas elevações sustentadas por intrusões graníticas, o processo morfogenético destrutivo foi delimitado na ruptura de curvatura e declive derivada da erosão diferencial no contato com rochas metamórficas do Complexo Gnáissico-Migmatítico. Nos demais topos da Serra do Mar, que não contam com corpos graníticos, esse limite foi destacado em porções mais inferiores das vertentes. Assume-se, portanto, a dificuldade de mapeamento e interpretação das áreas transicionais, localizadas nos terços médios, uma vez que possuam tanto caráter degradacional quanto agradacional. Todavia, o mapeamento buscou segmentar o predomínio de determinado processo morfogenético. Morfometricamente essa diferenciação da gênese denudacional foi realizada pela posição topográfica (atributo IPT), embora também seja observada pela transição entre segmentos

convexos (predomínio degradacional) e côncavos (agradacional) das vertentes, sob análise do perfil de curvatura. Essa quebra de curvatura é visível na paisagem (FIGURA 26), entretanto, para fins de modelagem, o IPT se mostrou mais representativo.

A FIGURA 26 ilustra essa problemática a partir de um evento recente de grande magnitude que respalda os resultados obtidos. Conforme descrito por Silveira *et al.* (2013) e Silveira *et al.* (2014), em março de 2011 na Serra da Prata ocorreu um conjunto de escorregamentos simultâneos, predominantemente translacionais, associado a um elevado volume de chuva (575 mm em 72 horas). O volume de material desprendido pelos escorregamentos, situados principalmente no terço superior das vertentes, foi transportado pelos vales, remobilizando também depósitos pretéritos. No mapa resultante, observa-se que as áreas delimitadas como processo morfogênico destrutivo correspondem às áreas de cicatrizes dos escorregamentos e também aos topos interfluviais secundários. Os vales onde o material convergiu foram mapeados como processo morfogênico fluvial destrutivo, enquanto as porções sobrejacentes preservadas, que indicam os depósitos coluviais de antigos escorregamentos, foram mapeadas como processo morfogênico denudacional construtivo.

Esse mesmo recorte demonstra, ainda, a exatidão da indicação de suscetibilidade à corrida de detritos, além do já apresentado cone de dejeção na base. O ponto modelado como suscetível (devidamente simbolizado no mapa e no modelo em perspectiva tridimensional) condiz com as áreas convergentes do rio Tingidor, afluente do rio Jacareí, em que o acúmulo de material decorrente dos escorregamentos foi transportado, seguindo o vale, na forma de corrida de detritos. Destaca-se, assim, que essa análise na Serra da Prata, local do evento morfodinâmico recente de maiores proporções no estado, valida os resultados do mapeamento para as classes que trazem, direta ou indiretamente, a indicação de prognósticos da evolução do relevo.

Em contraposição às elevações sustentadas pelos granitos, os recortes da FIGURA 25B e FIGURA 27 apresentam exemplos de áreas de menor elevação (média de 500 metros) nas quais o processo morfogênico denudacional construtivo foi mapeado próximo à base das montanhas, já que a ruptura de declive e curvatura não ocorre, necessariamente, nos terços superiores das vertentes. Quanto às áreas fluviais construtivas, verificou-se que foram modeladas de modo adequado no sopé

das montanhas e, eventualmente, em porções superiores que podem estar associadas a bacias de drenagem suspensas em remanescentes de paleosuperfícies, conforme discutido por Nascimento *et al.* (2013).

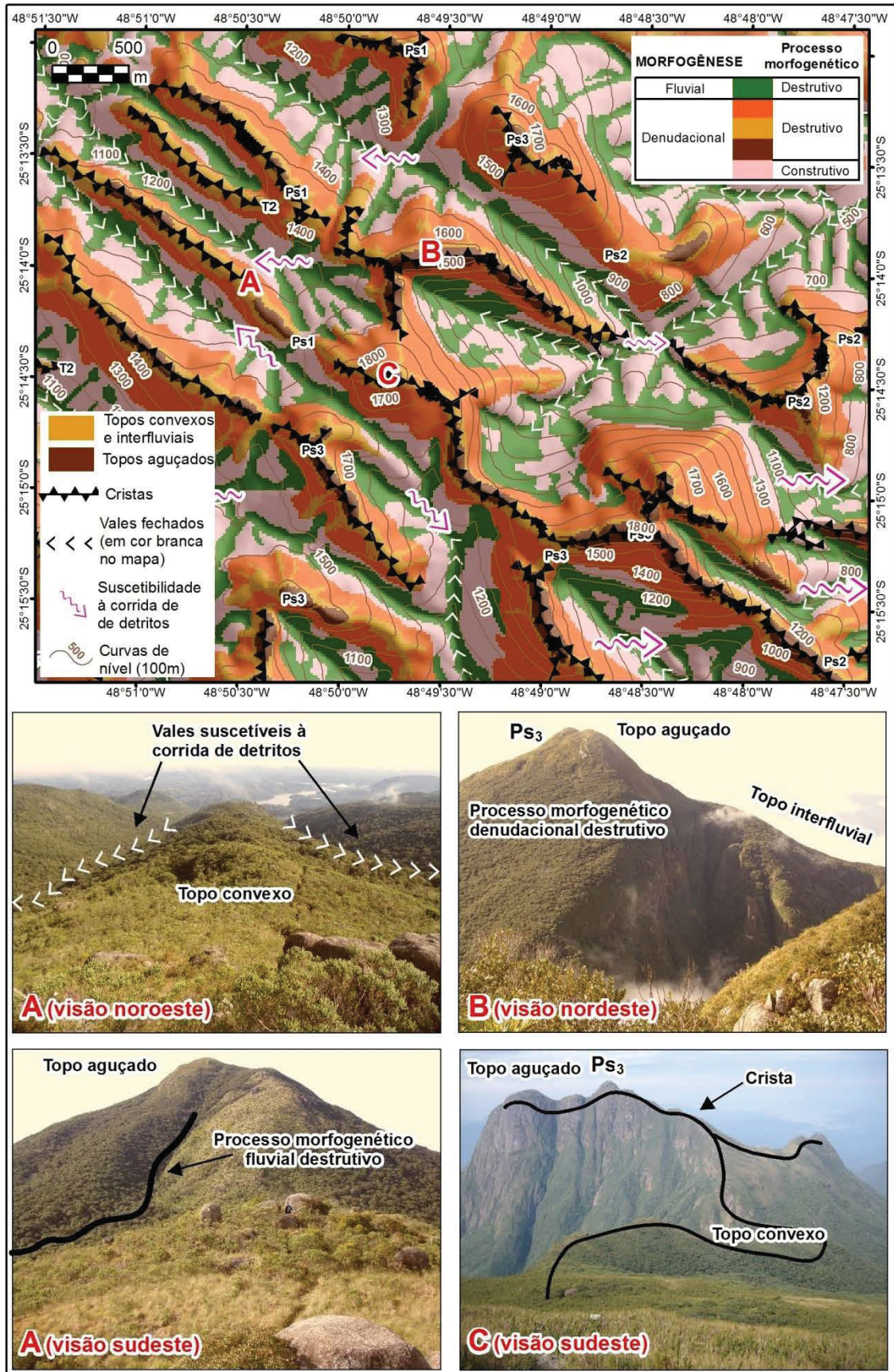
Em aspectos morfológicos, o conjunto de feições mapeadas constam em descrições qualitativas evidenciadas por publicações anteriores, como Bigarella *et al.* (1978), Costa *et al.* (2005), Maack (2002), Santos *et al.* (2006), e também guardam estreita relação com as características geológicas, como as linhas de cristas, formas dos topos e direção dos vales, influenciadas ora pela litologia, ora por estruturas de falhas, lineamentos e diques.

O atlas geomorfológico do Paraná (OKA-FIORI *et al.*, 2006) define a Serra do Mar com predomínio de "formas de relevo denudacionais, constituídas basicamente por escarpas e cristas com topos aguçados e topos convexos" (p. 12). Essa breve caracterização legitima os resultados apresentados: na perspectiva morfogenética, reafirma o predomínio denudacional; no âmbito morfográfico, evidencia as principais feições destacadas pelo mapeamento na Serra do Mar.

O recorte da FIGURA 28, na Serra do Ibitiraquire (ou Serra dos Órgãos), com as maiores altitudes do estado, que contempla o conjunto do Pico Paraná (1877m), representa uma das porções da Serra do Mar mapeada com os maiores segmentos de cristas alongadas, sendo que todos os picos locais, como o Taipabuçu (ponto B), Caratuva (ponto C), Ferraria e Itapiroca, foram corretamente modelados com topos aguçados. Mesmo segmentos convexos individualizados em cristas com predomínio de topo aguçado tiveram a representação adequada, como no Morro do Getúlio (FIGURA 28A, visão noroeste) ou num pequeno trecho próximo ao Pico Paraná (FIGURA 28C). Em função da alta declividade da área e desníveis superiores a 600 metros, 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 segunda ordem.

Na Serra do Mar verificou-se que, de todas as áreas mapeadas como topos, 20% foram classificadas como aguçado. A única porção do estado com proporcionalidade semelhante foi o norte do Primeiro Planalto (região do Açungui, vale do rio Ribeira), com 18%. A quantificação evidencia, para ambas, características de relevo montanhoso, sendo que o mesmo se aplica à delimitação

FIGURA 28 - MAPEAMENTO NA SERRA DO IBITIRAQUIRE



FONTE: o autor (2019)

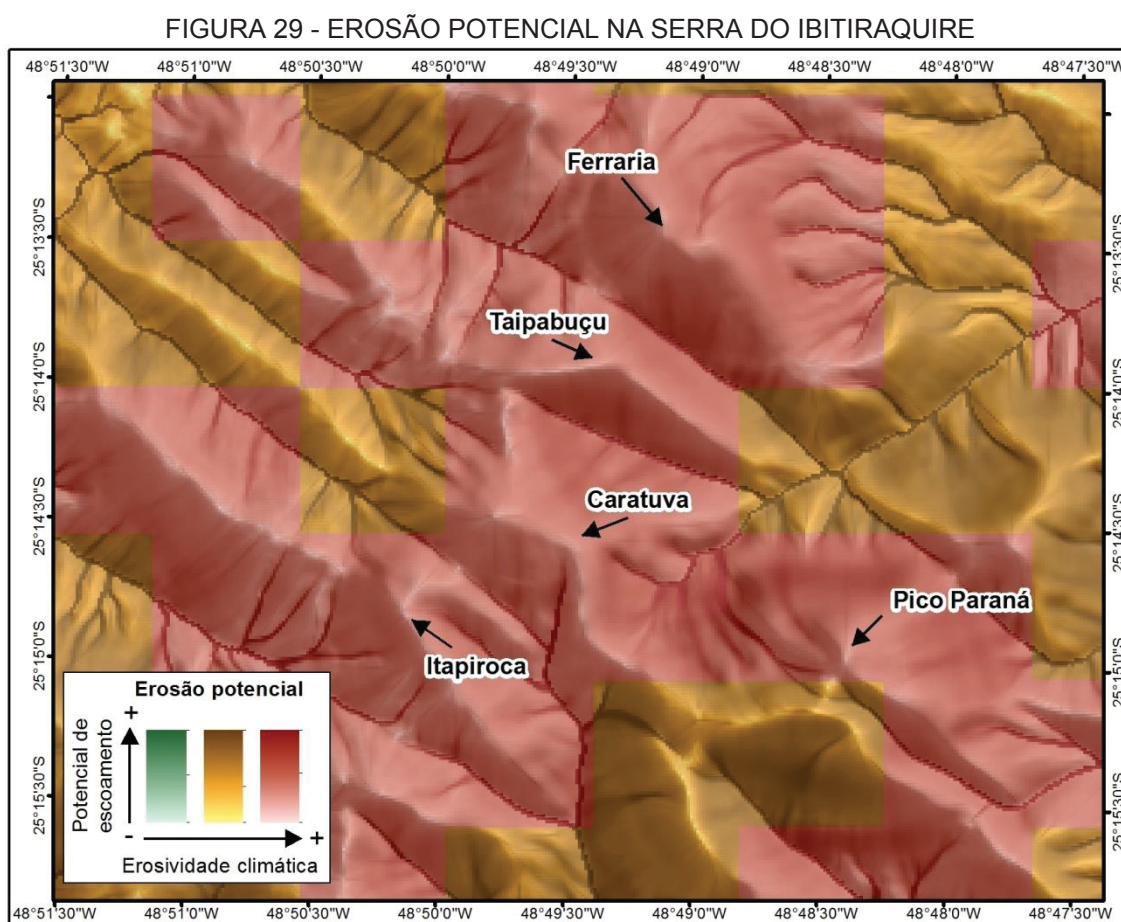
das cristas. Porém, na Serra do Mar verificou-se que as cristas e as vertentes são mais extensas e a amplitude altimétrica é maior. A FIGURA 35 e o mapa da Folha Represa do Capivari (APÊNDICE 2) representam o contato entre as duas porções mencionadas. Quanto aos vales mapeados, 70% foram categorizados como fechados, 25% como vales abertos e 5% como vales planos, o que indica o padrão de dissecação do relevo. Em função da escala e da filtragem preestabelecida, na Serra do Mar não foram identificados terraços ou topos planos associados a remanescentes de paleosuperfícies.

As características destacadas pela morfogênese, morfometria e morfografia auxiliam e se complementam à compreensão dos resultados auferidos pela modelagem da morfodinâmica. Como exemplo, 56% de todos os pontos modelados com suscetibilidade à corrida de detritos foram alocados na Serra do Mar (que, em área, representa apenas 1,6% do território paranaense). Em valores de densidade, isso representa, em média, um ponto mapeado como suscetível a cada 25 km². Especificamente para a categoria de suscetibilidade definida como muito alta, ou seja, com amplitude altimétrica superior a 500 metros, esse valor chegou a 88% (36 dos 41 pontos nesse nível). Destaca-se que todos os vales que registraram corridas de detritos no mencionado evento de 2011 foram modelados com suscetibilidade pelo mapeamento, conforme apresentado pela FIGURA 26, num recorte local, e pelo mapa da Folha Paranaguá (APÊNDICE 1), que permite a visualização abrangente da Serra da Prata. Por fim, reforça-se a relação entre os pontos suscetíveis à corridas de detritos, a montante, e os cones de dejeção, a jusante, como sistema integrado da evolução do relevo.

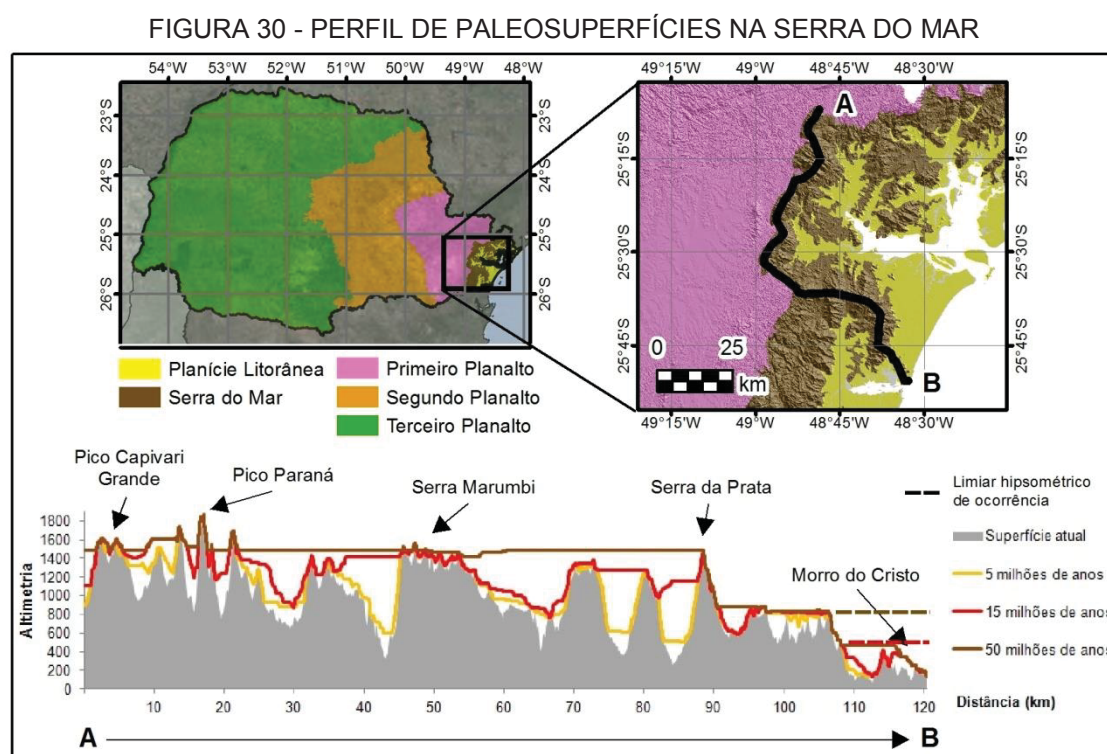
Em relação à erosão potencial, disposta como cartograma adicional nos mapas elaborados (apêndices), os resultados possibilitaram uma análise complementar da dinâmica do relevo. Para fins comparativos, o recorte da FIGURA 29 é o mesmo da FIGURA 28, na Serra do Ibitiraquire, e traz a representação da exposição erosiva na área. A variável visual intensidade indica o atributo potência de escoamento, onde os topos e divisores, com tons mais claros, apresentam baixa potência de escoamento, os canais, com tons mais escuros, apresentam muito alto potencial, e as vertentes declivosas, com tons intermediários, caracterizam média ou alta exposição à dinâmica erosiva. A diferenciação por cores, por sua vez, indica o índice de erosividade climática, única variável calculada que não utilizou dados

morfométricos e, por esse motivo, foi associada a um atributo georfométrico para ilustrar as possibilidades de vinculação.

Como demonstrado pela FIGURA 29, as áreas com maior potencial de escoamento contemplam as áreas mapeadas como processo morfogenético destrutivo na FIGURA 28. Além disso, observou-se que pelo fato da Serra do Ibitiraquire estar localizada numa posição que compreende o reverso da escarpa erosiva da Serra do Mar, onde o Pico Caratua é o divisor entre as bacias hidrográficas que drenam para o litoral e para o planalto, o efeito orográfico restringiu o maior nível de erosividade climática (em vermelho) às áreas próximas aos topos. Segundo Vanhoni e Mendonça (2008), a Serra do Mar funciona como barreira para o avanço de massas de ar. Como consequência, a Planície Litorânea, as vertentes expostas a leste e os topos da Serra do Mar foram mapeadas com um nível de erosividade climática maior que a oeste, já no contato com o Primeiro Planalto (em amarelo). Nos mapas do APÊNDICE 1 e APÊNDICE 2, como exemplo, essa característica discutida é evidenciada nos cartogramas.



Referente à morfocronologia, a modelagem resultante na Serra do Mar foi a de maior representatividade e correlação em todo o estado, tanto em aspectos qualitativos quanto quantitativos. A FIGURA 30 exibe um perfil topográfico que perpassa três serras locais muito discutidas no presente trabalho: Serra do Ibitiraquire, Serra do Marumbi e Serra da Prata. Como apontado graficamente, a aplicação do atributo BTH com distintos tamanhos da janelas móveis demonstrou que: i) a paleosuperfície equivalente a 50 milhões de anos (Ps_3 , janela de 60x60 km) se sobrepôs à superfície atual nos principais picos de cada serra local; ii) a paleosuperfície de 15 milhões de anos (Ps_2 , janela de 10x10 km) contemplou os picos intermediários, de elevações secundárias presentes nos próprios conjuntos das serras; iii) a paleosuperfície de 5 milhões de anos (Ps_1 , janela de 3x3 km) tangenciou todas as demais elevações e também os topos locais, que guardam relação direta com os divisores das bacias hidrográficas atuais.



FONTE: o autor (2019)

Numa análise preliminar da morfocronologia o perfil ressaltou, ainda, a importância do limiar altimétrico como critério de corte para a ocorrência de remanescentes de paleosuperfícies, já que nas áreas próximas à Planície Litorânea, sobretudo no trecho final do perfil (entre o pico da Serra da Prata e o Morro do

Cristo, em Guaratuba) registra-se a ausência de grandes elevações, o que diminuiu os valores do BTH. Por esse motivo, conforme será embasado ao longo da tese, foi compreendido que no estado do Paraná a Ps_3 não tem ocorrência abaixo da cota 800 metros, a Ps_2 abaixo de 500 metros e a Ps_1 em cotas inferiores a 300 metros, enquanto que para os níveis mais recentes, de 500 mil (T_2) e 250 mil anos (T_1), não foi atribuída altitude máxima de ocorrência.

No mapa resultante, além dos perfis topográficos acrescentados como informações adicionais, a indicação morfocronológica foi inserida em todos os topos e também em remanescentes planos de paleosuperfícies ou terraços (embora, na Serra do Mar, tais feições não tenham sido mapeadas). 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. A FIGURA 31 apresenta uma comparação visual entre o modelo derivado e a ilustração da Serra do Marumbi, de Bigarella *et al.* (1978), com a atribuição dos níveis de pediplanos e pedimentos embutidos. Esse padrão com Ps_3 (equivalente ao Pd_3) nos principais picos montanhosos, Ps_1 (Pd_1) em elevações intermontanas e T_2 (P_2) nos morros convexados das porções inferiores, foi verificado de modo correto em toda a Serra do Mar.

A paleosuperfície designada de Ps_3 foi modelada tendo como referência a escala temporal de 50 milhões de anos, equivalente à Superfície Sul-Americana (KING, 1956; VALADÃO, 1998), Superfície Purunã (AB'SABER e BIGARELLA, 1961), Superfície Japi (ALMEIDA, 1964), além do mencionado pediplano Pd_3 de Bigarella *et al.* (1965; 1978), sendo que a elaboração dessa superfície de erosão coincide com o fim da sedimentação cretácea no Brasil e corresponde, atualmente, aos níveis de cimeira. No mapeamento realizado, esses níveis de cimeira preservados representam os picos dissecados sustentados por intrusões graníticas na Serra do Mar, com cotas altimétricas superiores a 1400 metros, como mostram os mapas dos APÊNDICES 1 e 2.

Como exemplo da reconstituição evolutiva do relevo com base na modelagem, a FIGURA 32 evidencia as paleosuperfícies em perspectiva tridimensional na Serra do Ibitiraquire. Embora se admita que seja um modelo simplificado, por considerar somente cálculos morfométricos regionais, ele

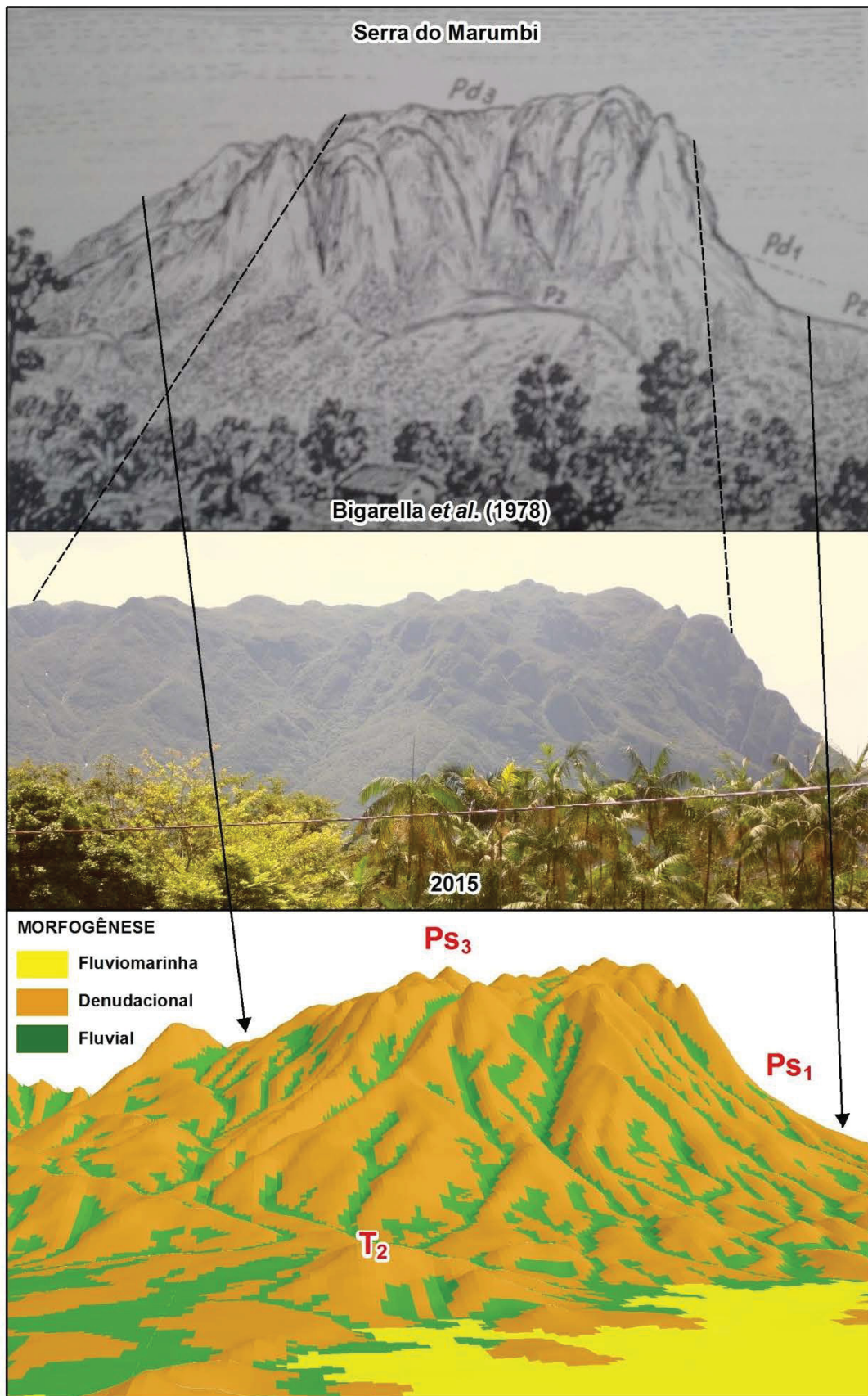
possibilitou a representação quantitativa de modelos teóricos que trazem consigo subjetividades intrínsecas às próprias discussões sobre a gênese das superfícies de aplanamento. Em todos os cenários modelados foi constatado o efeito da erosão diferencial no progressivo rebaixamento do relevo serrano, na abertura dos vales e na exposição dos remanescentes preservados que, atualmente, registram na paisagem antigos níveis erosivos.

Se na análise qualitativa, de representatividade na paisagem, o mapeamento morfocronológico obteve correspondência às interpretações evolutivas de longo-termo, o êxito da modelagem foi destacado pela correlação quantitativa com estimativas de taxas de denudação publicadas por Salgado *et al.* (2014) em bacias hidrográficas que drenam para o Primeiro Planalto (rio Ribeira) e para a Planície Litorânea (FIGURA 33). Essa diferenciação é importante por considerar que a Serra do Mar encontra-se em recuo erosivo e, portanto, as bacias a leste apresentam padrão mais dissecado em função do nível de base.

Os resultados tabulados são apresentados pela TABELA 19, na qual consta a denudação estimada pela concentração de ^{10}Be , para cada bacia da FIGURA 33, em relação às paleosuperfícies Ps_3 (50 Ma), Ps_2 (15 Ma) e Ps_1 (5 Ma). Os resultados em metros por milhão de ano (m/Ma), derivados da subtração entre cada paleosuperfície e o MDT 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: para a Ps_3 , o valor médio foi 13,6 e a máxima 20,6 m/Ma; na Ps_2 , o valor médio resultante foi de 7,7 e a máxima de 23,9 m/Ma; por fim, a Ps_1 teve 12,8 como taxa média e 49,9 m/Ma como máxima.

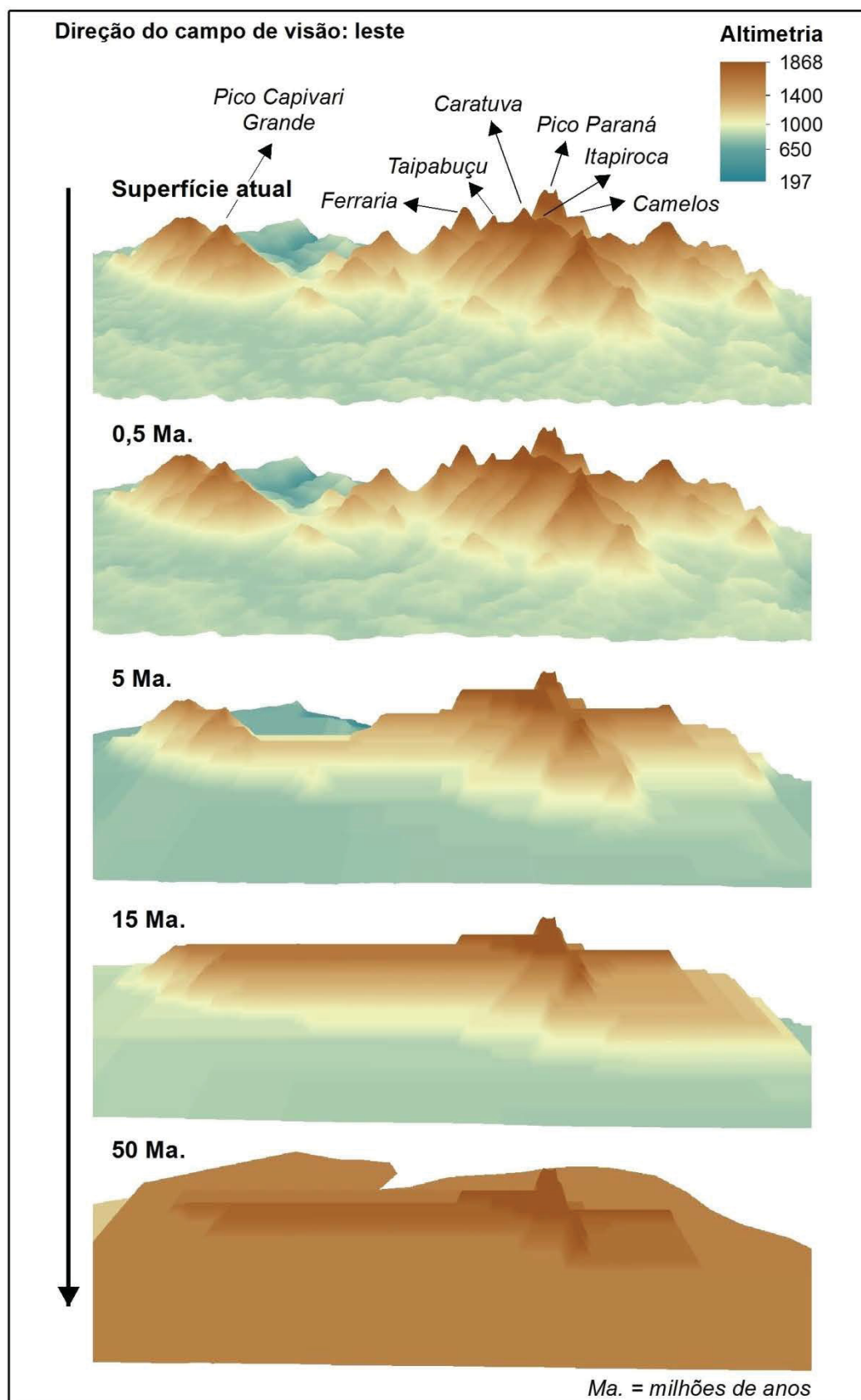
Na comparação detalhada, bacia a bacia, a Ps_3 foi a de maior correlação com os valores estimados por Salgado *et al.* (2014), possivelmente por considerar uma escala temporal mais abrangente que as outras duas paleosuperfícies modeladas. Notou-se, nas sub-bacias hidrográficas do rio Ribeira, que todos os valores da Ps_3 seguiram uma proporção de valores pouco abaixo das taxas de referência. Ainda sim, considerando os valores médios, o erro foi de apenas 1,43 m/ma (para menos). Por ter se mostrado proporcional, essa pequena divergência pode estar associada à definição dos parâmetros para cálculo da paleosuperfície. Ou seja, pequenos ajustes no tamanho da janela móvel para cálculo do BTH ou nas

FIGURA 31 - PALEOSUPERFÍCIES E MORFOGÊNESE DA SERRA DO MARUMBI



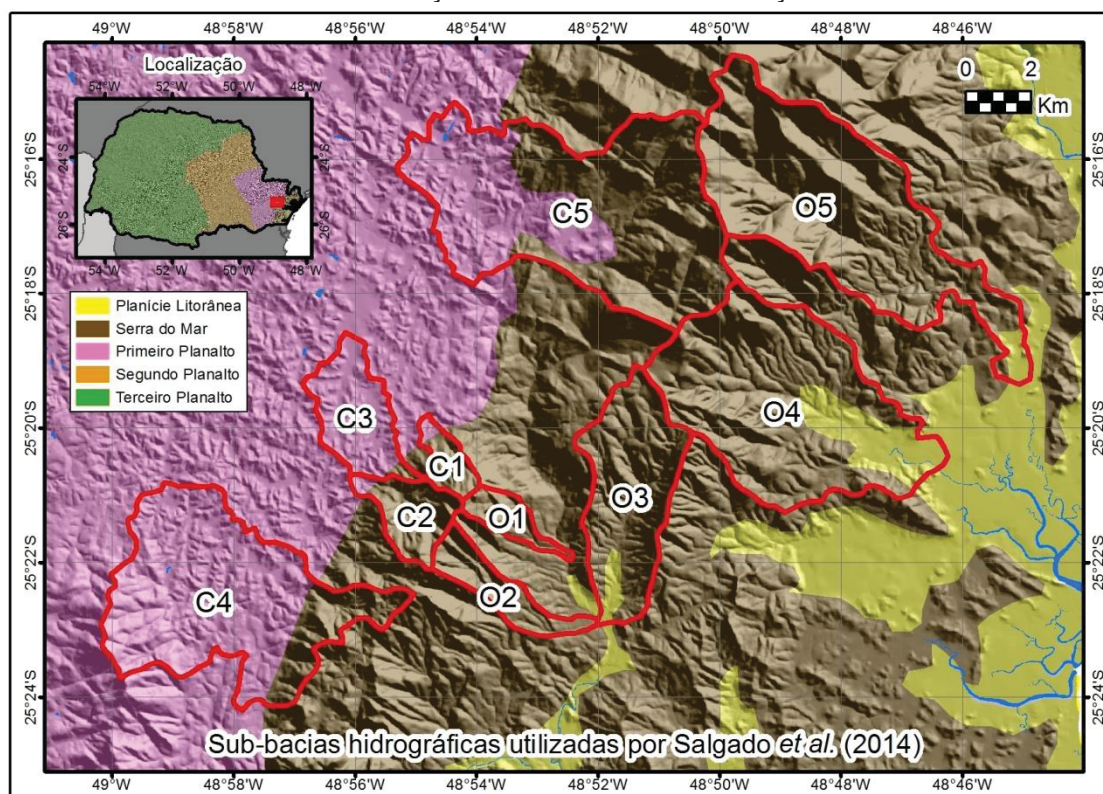
FONTE: o autor (2019)

FIGURA 32 - MODELAGEM DE PALEOSUPERFÍCIES NA SERRA DO IBITIRAQUIRE



FONTE: o autor (2019)

FIGURA 33 - SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS UTILIZADAS POR SALGADO *et al.* (2014) PARA A MENSURAÇÃO DA TAXA DE DENUDAÇÃO



FONTE: o autor (2019)

TABELA 19 - RESULTADOS DAS ESTIMATIVAS DE TAXAS DE DENUDAÇÃO NA SERRA DO MAR

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

FONTE: o autor (2019)

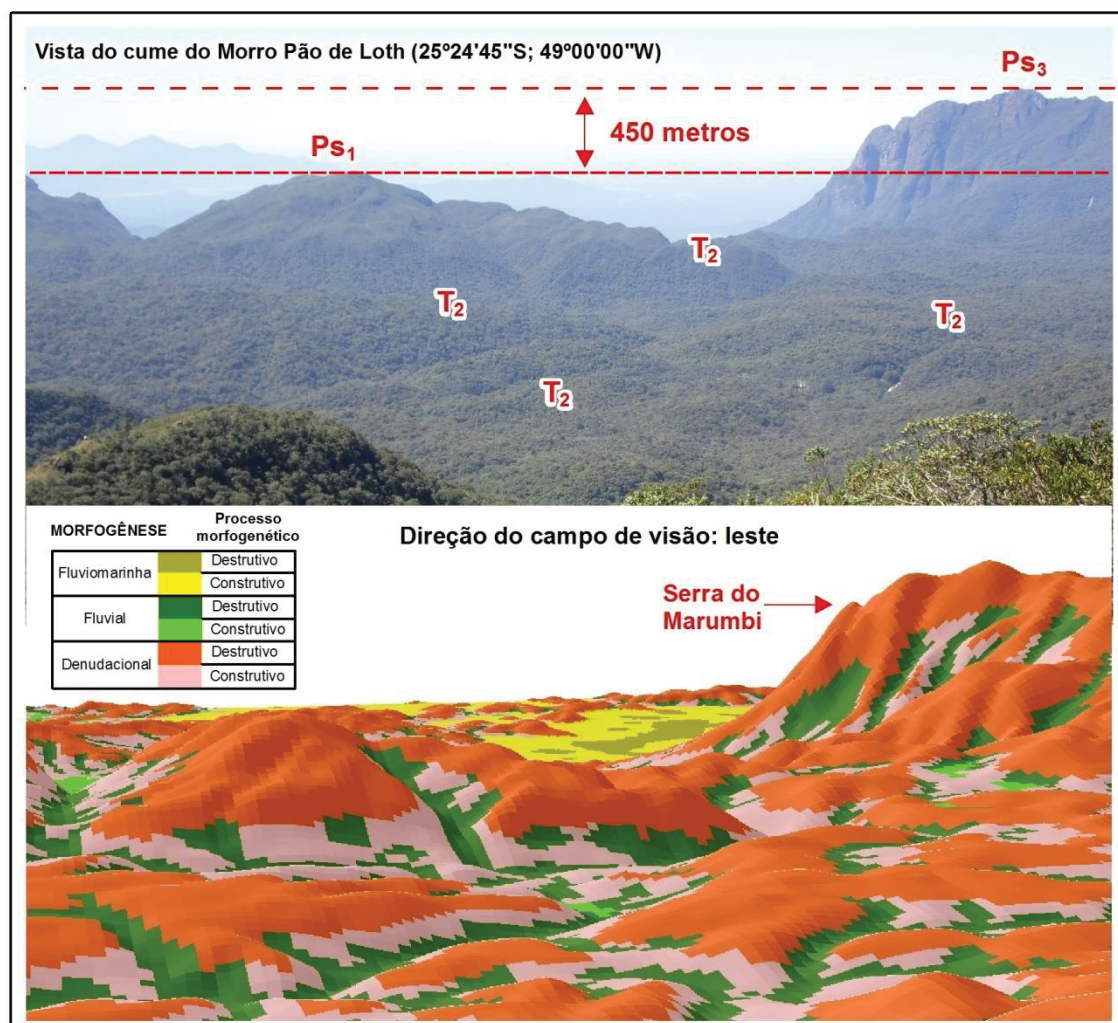
idades vinculadas à taxonomia de Tricart (1965) tendem a refinar o resultado obtido.

Nas sub-bacias hidrográficas da Bacia Litorânea, o erro médio da Ps_3 em relação à taxa de referência foi maior: 6,33 m/ma (também para menos), sendo que a bacia O3 foi a de maior divergência. Isso se deve ao mencionado contato com a Planície Litorânea, como se observa na FIGURA 33, que diminui os valores obtidos pelo BTH e, como consequência, dos valores de denudação (subtração entre os níveis das paleosuperfícies e a superfície atual). Entretanto, os resultados também se mostraram proporcionais, pois todas as sub-bacias da porção leste tiveram taxa de denudação maior do que as da porção oeste. No conjunto, representou quase o dobro: 17,8 m/Ma, para as sub-bacias hidrográficas da Bacia Litorânea, e 9,3 m/Ma, nas sub-bacias do rio Ribeira. Os resultados da modelagem indicaram, portanto, que na porção leste a denudação é, em média, 1,9 vezes maior que a oeste, enquanto Salgado *et al.* (2014) chegaram ao valor de 2,1 a 2,6 vezes maior.

A FIGURA 34 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, no Morro Pão de Loth, com campo de observação para a Serra do Marumbi. No caso representado, a diferença de altitude entre a Ps_3 e a Ps_1 foi de 450 metros, o que representou, na área, uma taxa média de denudação de 10 m/Ma entre 50 Ma e 5 Ma. Entre a Ps_1 e a T_2 , que contempla todos os topos convexos inferiores, a amplitude média de 200 metros 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 ($47,7 \pm 5,65$).

Destaca-se, por fim, que as taxas de denudação do conjunto de bacias a leste (O) e a oeste (C) estimadas por Salgado *et al.* (2014) foram contempladas em todas as paleosuperfícies modeladas entre os valores médios e máximos obtidos.

FIGURA 34 - MODELAGEM NA SERRA DA BAITACA E SERRA DO MARUMBI



FONTE: o autor (2019)

4.2.3 Primeiro Planalto

O mapeamento do Primeiro Planalto reforçou as diferenças entre a porção norte e porção sul desse grande compartimento geomorfológico. Maack (2002) classificou as duas porções como Planalto de Curitiba e Região Montanhosa de Açungui; o mapa do Projeto RADAMBRASIL (COSTA *et al.*, 2005) distinguiu como Planalto de Curitiba e Serrania do Ribeira; já o mapa geomorfológico do estado do Paraná (SANTOS *et al.*, 2006) delimitou três subunidades morfoesculturais a sul (Planalto de Curitiba, Planalto do Alto Iguaçu e Blocos Soerguidos do Primeiro Planalto) e outras quatro principais a norte, na bacia do rio Ribeira (Planalto Dissecado de Tunas do Paraná, Planalto Dissecado de Rio Branco do Sul, Planalto Dissecado de Adrianópolis e Planalto Dissecado do Alto Ribeira).

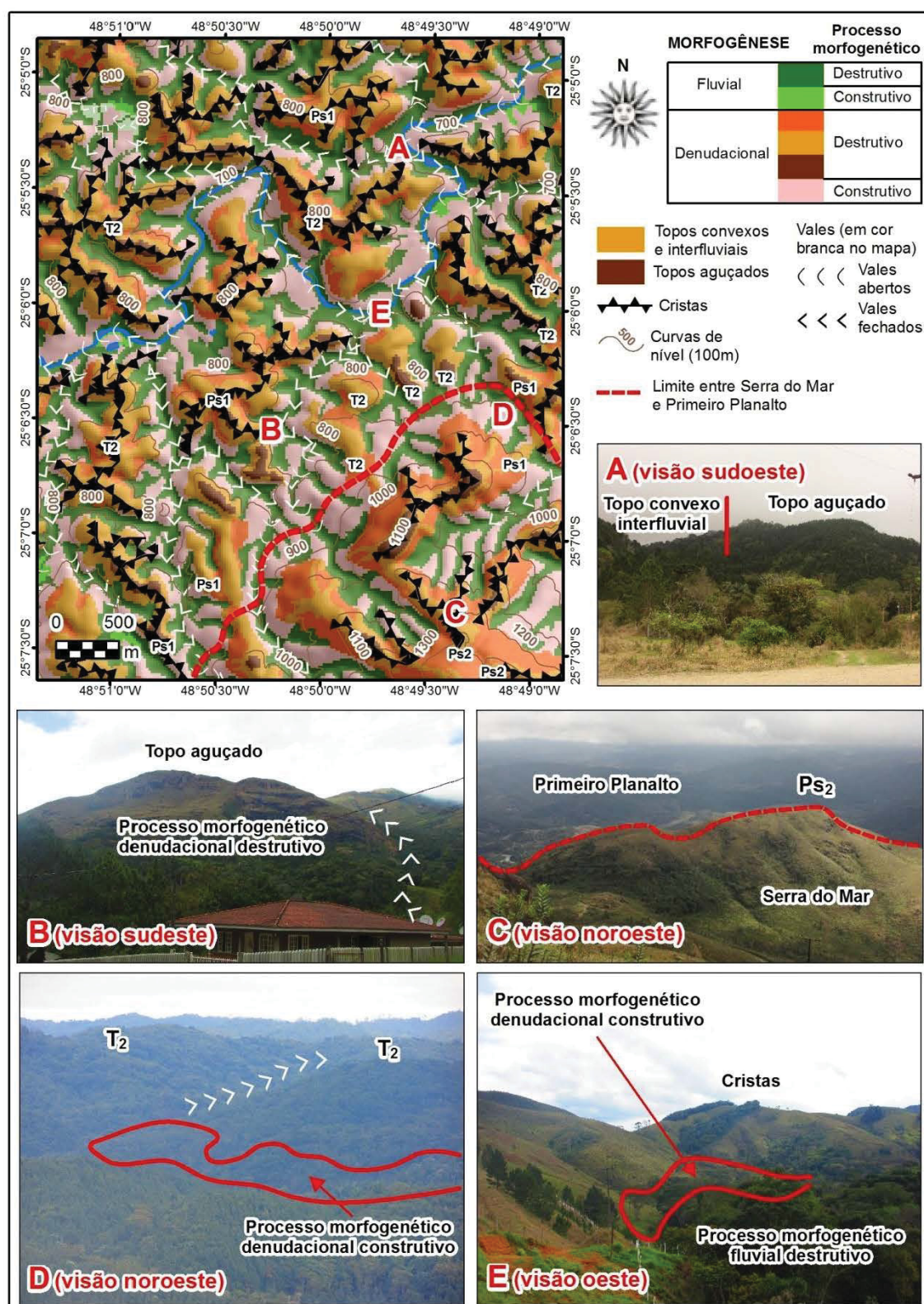
Dois fatores principais contribuem para essa diferenciação expressa no relevo: i) a diversidade litológica, como demonstram os cartogramas geológicos no APÊNDICE 1 (porção nordeste), e principalmente os APÊNDICES 3 e 4 (que compreendem ambas as bacias); ii) o efeito nível de base, já que o rio Ribeira tem seu curso a leste, mais próximo ao oceano e com maior desnível altimétrico que o rio Iguaçu, que segue a oeste e cruza o estado até desaguar no rio Paraná.

Destaca-se, também, que a noroeste, na região de Castro, encontra-se uma porção distinta que compreende parte das bacias hidrográficas dos rios Tibagi e rio Itararé que drenam para oeste e adentram a bacia sedimentar do Paraná. No contexto do Primeiro Planalto, o relevo dessa região apresenta peculiaridades por ser um terreno antigo, cuja geologia, conforme MINEROPAR (2001), abarca um evento de magmatismo ácido entre o Proterozoico Superior e Paleozoico Inferior e uma bacia vulcano-sedimentar restrita Paleozoica — além das extensas planícies fluviais holocênicas com os sedimentos recentes dos principais rios.

Em campo foram amostrados 74 pontos de análise e conferência em 960 km percorridos com acompanhamento em tempo real. Na porção norte, na bacia hidrográfica do rio Ribeira (FIGURA 1), o mapeamento ressaltou o relevo dissecado (declividade média de 33%, contra 34% na Serra do Mar), com vertentes mais curtas (em média 500 metros), amplitude altimétrica de 1780 metros e alta densidade de drenagem evidenciada pelo processo morfogenético fluvial destrutivo.

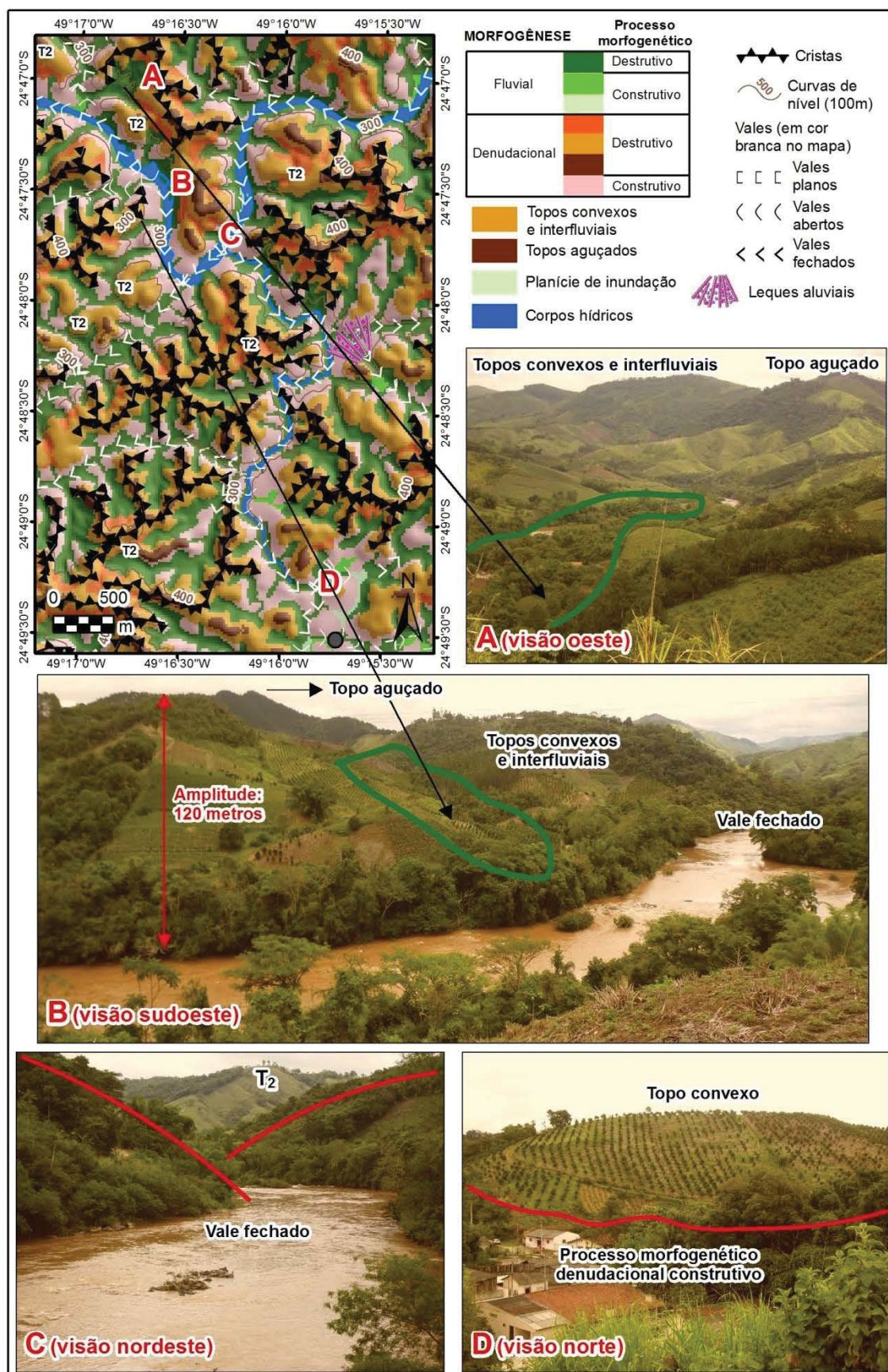
Como exemplo dessas características, a FIGURA 35 representa o contato entre a Serra do Mar (Serra do Ibitiraquire) e o nordeste do Primeiro Planalto, onde se visualiza o padrão dissecado com predomínio de vales fechados, assim como na FIGURA 36, em que consta o próprio rio Ribeira. Em contraposição, na porção sul, na bacia hidrográfica do rio Iguaçu, foi constatado o padrão predominante de relevo ondulado (declividade média de 7,4%), com vertentes mais extensas (em média 700 metros), amplitude altimétrica de 645 metros, incluindo os topos dos blocos soerguidos de intrusões graníticas, e presença de extensas planícies de inundação. A FIGURA 37 e o mapa do APÊNDICE 3 ilustram tais evidências.

FIGURA 35 - MAPEAMENTO ENTRE A SERRA DO MAR E NORTE DO PRIMEIRO PLANALTO



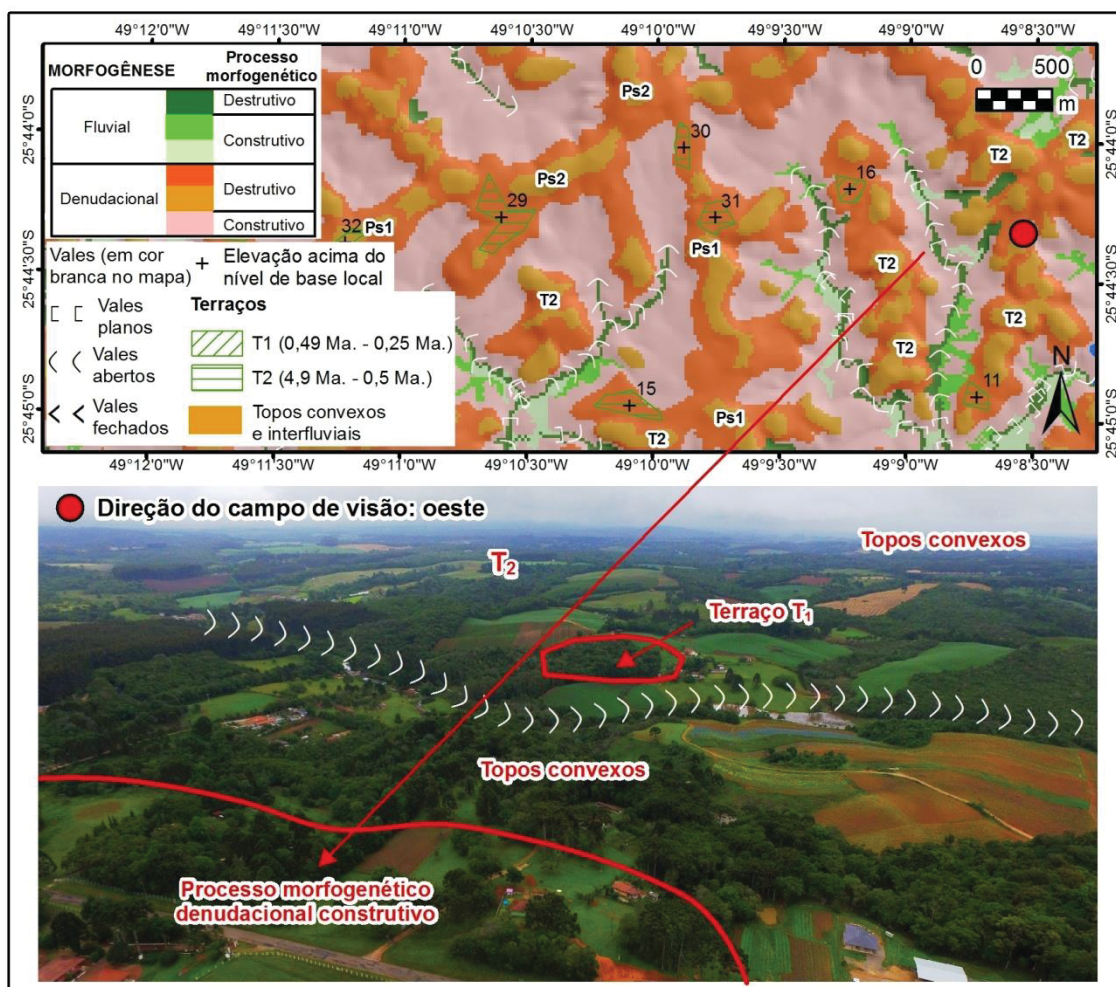
FONTE: o autor (2019)

FIGURA 36 - MAPEAMENTO NA REGIÃO DO VALE DO RIO RIBEIRA



FONTE: o autor (2019)

FIGURA 37 - MAPEAMENTO NO PLANALTO DE CURITIBA



FONTE: o autor (2019)

Outras distinções foram destacadas em relação aos objetos morfológicos 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 1,7km/km² no Ribeira e de 0,06km/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: Serra da Baitaca (granitos), nos municípios de Quatro Barras e Piraquara, que contempla o Morro Anhangava; Serra do Quiriri (granulitos de alto grau metamórfico), no município de Tijucas do Sul; Blocos graníticos nos municípios de Agudos do Sul e Mandirituba.

Quanto às planícies de inundação, a proporção em relação às áreas mapeadas como morfogênese fluvial foi de 1,8% a norte e 38,6% a sul, sobretudo em função da presença da bacia sedimentar de Curitiba e suas extensas planícies holocênicas. Para fins de planejamento esse é um aspecto relevante, já que a área compreende a Região Metropolitana de Curitiba, porção mais urbanizada do estado, conforme retratado no mapa do APÊNDICE 3. Por fim, os vales mapeados também se mostraram condizentes à configuração geomorfológica regional: na bacia do Ribeira, 3,6% dos vales foram classificados como planos, 14,8% como abertos e 81,6% como fechados; na bacia do Iguaçu, 43,1% foram mapeados como vales planos, 41,6% como abertos e 15,3% como fechados.

Em relação à morfogênese, em campo foi verificado o mapeamento compatível das áreas fluviais e denudacionais. Destaca-se que o Primeiro Planalto foi o compartimento geomorfológico que demandou maior número de regras para a classificação morfogenética, sistematizada para todo o estado do Paraná (TABELA 3), justamente em função da heterogeneidade geomorfológica discutida e da dificuldade de representação das feições fluviais na bacia sedimentar de Curitiba.

Em aspectos quantitativos, a fragmentação da morfogênese fluvial demonstrou que as regras de modelagem conseguiram discernir áreas em contextos distintos: na bacia do rio Ribeira, foram mapeados 95,4% de áreas fluviais com processo morfogenético destrutivo e 4,6% com processo construtivo; na bacia do rio Iguaçu, os valores foram de 36% para o processo morfogenético fluvial destrutivo e 64% para o construtivo. Esses resultados, associados às características dos vales, reforçam o padrão degradacional a norte e agradacional a sul.

A morfogênese denudacional, por sua vez, indicou a segmentação das vertentes a partir do predomínio de processos atuantes para sua elaboração. Em áreas com relevo mais dissecado, constatou-se maior abrangência do processo morfogenético destrutivo (reforçada pelos padrões de topos já apresentados), sendo que as porções denudacionais construtivas foram mapeadas de modo mais restrito nos terços inferiores das vertentes. Em campo, como apontado na FIGURA 38B, verificou-se que essas porções normalmente estão associadas à presença de depósitos coluvionares, favorecida pela ruptura de declive e transporte de material intemperizado a montante por processos gravitacionais.

Em áreas com relevo suave ondulado, ou seja, declividades inferiores a 8%, verificou-se que as áreas mapeadas como processo morfogenético construtivo

preponderaram, devido à maior extensão das vertentes e menor densidade de drenagem. Nesse caso, as porções denudacionais destrutivas se concentraram nas adjacências dos divisores de águas locais. Conforme Salamuni *et al.* (2013), o município de Curitiba possui planícies aluvionares e topos alongados e arredondados, sendo esse o padrão identificado pelo presente mapeamento, conforme o APÊNDICE 3.

Os contrastes do mapeamento morfogenético no Primeiro Planalto são bem evidenciados pela FIGURA 35 e FIGURA 36 (bacia do Ribeira) em relação à FIGURA 37 (bacia do Iguaçu), no município de São José dos Pinhais. Como se observa, o processo morfogenético fluvial destrutivo, a norte, ocupa toda a extensão dos vales, enquanto a sul se limita aos talwegues.

A FIGURA 36, na divisa entre os municípios de Cerro Azul de Doutor Ulysses, traz um recorte que exemplifica o relevo diversificado da bacia hidrográfica do rio Ribeira. O destaque dado à morfogênese fluvial destrutiva nas fotografias A e B ressalta um aspecto importante do mapeamento: muitas incisões fluviais, de menor expressividade, não foram mapeadas com segmentos de vales devido ao critério estabelecido para área de contribuição superior a 1 km². Dessa forma, os vales foram representados sobretudo a partir de canais de segunda ordem, enquanto todos os vales escavados dos canais de primeira ordem foram mapeados corretamente com morfogênese fluvial. Assim, mesmo com a generalização preestabelecida para um objeto específico, objetivando a clareza para leitura do mapa, não houve perda de informações no contexto geral.

O Primeiro Planalto conta, ainda, com influência de relevo cárstico ocupando 5% de sua área total (0,4% do território do estado do Paraná). Conforme descrito anteriormente, a representação da morfogênese cárstica foi incluída de modo associativo, sobreposta às demais informações do mapa, como ilustra a FIGURA 38. Os polígonos, simbolizados com as variáveis visuais cor e orientação, se referem às áreas de ocorrência de mármores dolomíticos, metadolomitos e metacalcários mapeados pela MINEROPAR (2001). Ressalta-se, novamente, que esse foi o único objeto geomorfológico incluído no presente trabalho que não foi modelado a partir de atributos geomorfométricos.

Embora muitas publicações recentes utilizem a análise digital do relevo para identificação de feições cársticas com assinaturas geomorfométricas específicas (NASCIMENTO *et al.*, 2012; WU *et al.*, 2016) normalmente em escalas de detalhe

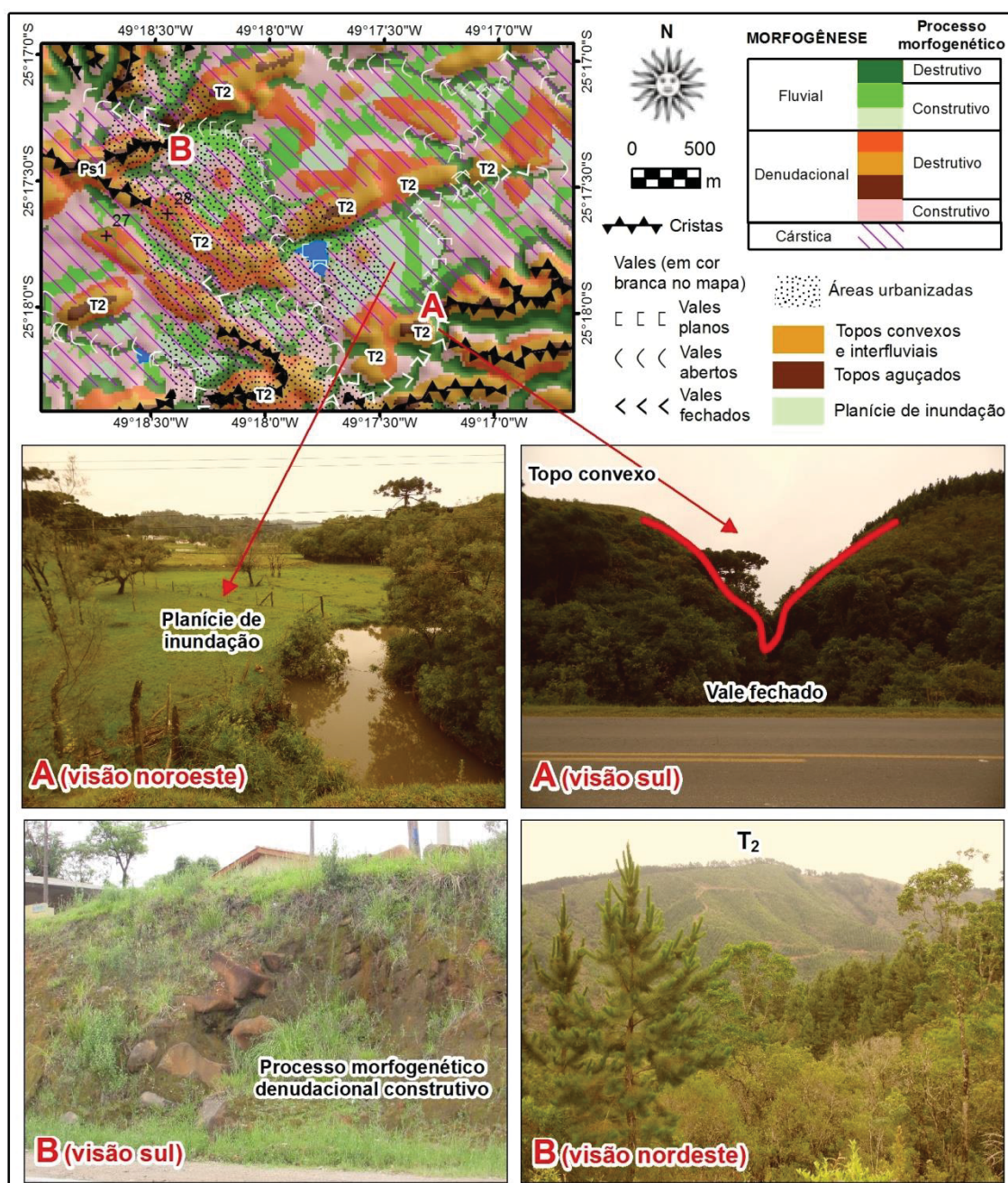
(maiores que 1:5.000), o presente mapeamento não foi capaz de atribuir parâmetros de classificação sem que os objetos cársticos se confundissem com outros objetos, já que a proposta buscou sistematizar regras unificadas para todo o estado do Paraná. Além disso, acrescenta-se a limitação da escala da base de dados (1:50.000) e da impossibilidade de inferir informações sobre o relevo em subsuperfície, como as cavernas características. Uma perspectiva para trabalhos futuros é a definição individualizada de parâmetros classificatórios para áreas de ocorrência do carste.

Entretanto, apesar das ponderações acerca das limitações da modelagem, a indicação da morfogênese cárstica associada aos demais aspectos mapeados se mostrou adequada e como importante informação auxiliar à análise geomorfológica. Nesse sentido, a interpretação de objetos sobrepostos passou a considerar a influência desse ambiente peculiar. A FIGURA 38A traz um exemplo interessante, onde a área da fotografia a noroeste, a montante, foi mapeada como planície de inundação e a área da fotografia a sul, sentido jusante, indica um vale fechado.

Em outros casos, uma planície mapeada numa cabeceira de drenagem poderia ser entendida como um erro do modelo. Mas, devido às especificidades do carste, possivelmente a área sofreu um processo de subsidência (colapso) associado às rochas carbonáticas. Assim, embora a área apresente morfometria e morfografia características de uma planície de inundação (atestada pelos elementos visíveis na fotografia), a indicação sobreposta da gênese cárstica possibilita outras interpretações sobre a origem da feição. Além disso, mesmo em ambiente cárstico a área do recorte contempla muitas características geomorfológicas da bacia do rio Ribeira, como demonstrado pela FIGURA 38B.

Quanto aos cones de dejeção, ao todo foram mapeados 104 feições, que representam 20% do total identificado no estado do Paraná. Desses 104 cones, 24,1% foram categorizados como grandes, 43,3% como médios e 32,6% como pequenos. Os cones de maior expressividade (com amplitude altimétrica superior a 200 metros) foram modelados corretamente nos contatos com as elevações da Serra do Mar, a leste, e com a escarpa na transição para o Segundo Planalto, a oeste (FIGURA 14), que evidencia o recuo erosivo dessa feição estrutural e expõe os cones de dejeção como testemunho de processos agradacionais. Os demais cones categorizados, incluindo outros grandes em menor quantidade, foram modelados integralmente na região do Ribeira.

FIGURA 38 - MAPEAMENTO EM ÁREA DE RELEVO CÁRSTICO (COLOMBO)



FONTE: o autor (2019)

E, conforme citado, além das destacadas diferenças entre as bacias dos rios Iguaçu e Ribeira, a região de Castro no noroeste do Primeiro Planalto — alocada no eixo central do Arco de Ponta Grossa — configura-se com um relevo que detém especificidades em função da litologia (com resquícios vulcânicos do supercontinente de Rodínia) e das bacias dos rios Tibagi e Itararé, que drenam a área para oeste (efeito do nível de base).

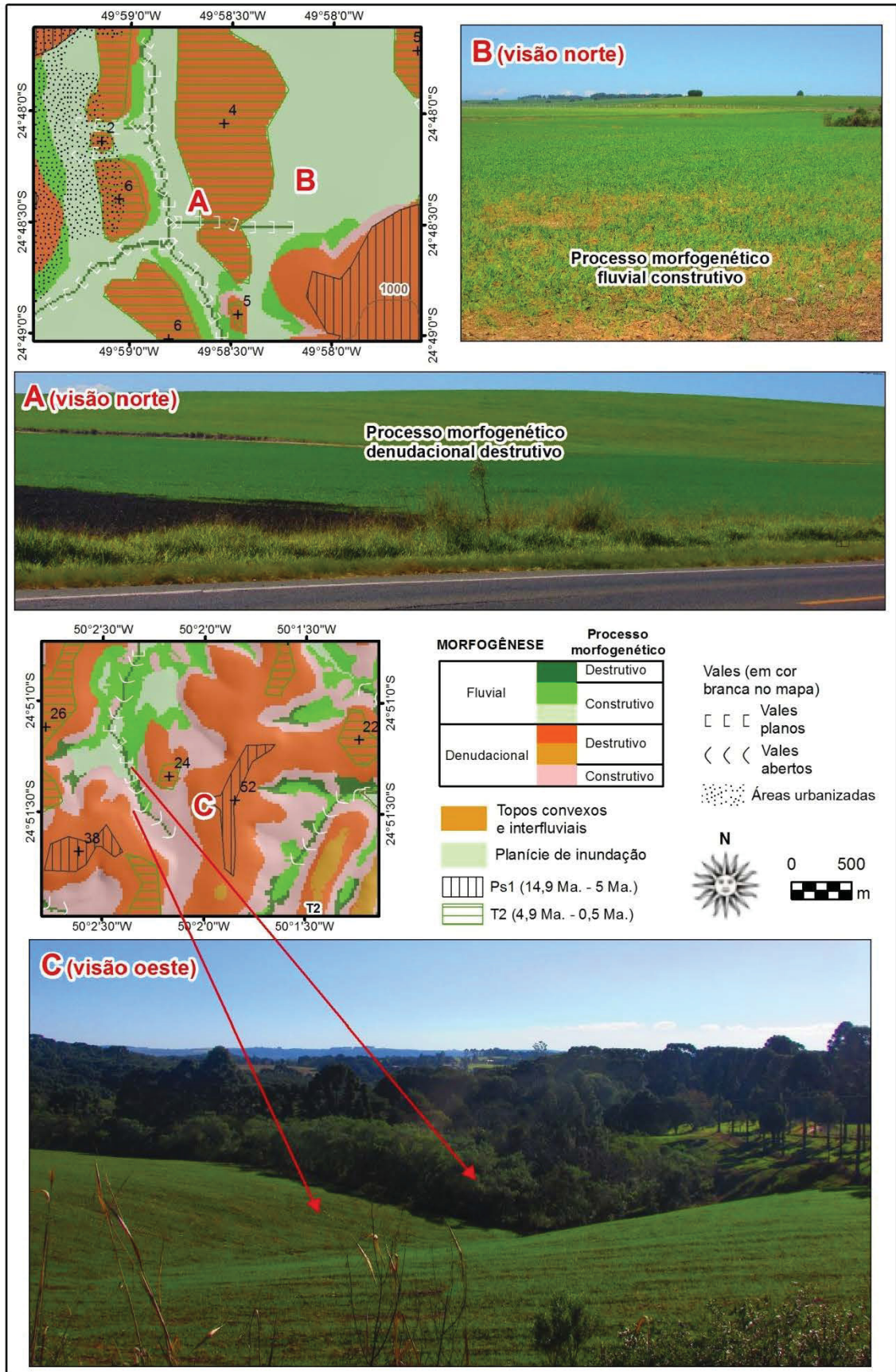
O mapeamento derivado foi condizente à natureza geológica da região e aos efeitos da erosão diferencial na configuração do relevo local. Três padrões foram ressaltados: i) relevo com predomínio de gênese destrutiva, bastante dissecado; ii) relevo com predomínio de gênese construtiva, pouco dissecado; iii) relevo com leve predomínio de gênese destrutiva, mas que conta com extensas porções deposicionais inseridas.

As porções de relevo com as principais variações altimétricas (i), na região, constam inseridas na Formação Itaiacoca (MINEROPAR, 2001), com filitos de origem vulcânica, mármore dolomíticos, corpos quartzíticos (normalmente orientados a nordeste) e os diques de diabásio (NW-SE) que cortam o estado. Tais litologias conferiram, no mapeamento, a prevalência de segmentos de cristas destacadas, topos aguçados, vales fechados e, como já mencionado, de morfogênese destrutiva — tanto denudacional quanto fluvial. O potencial erosivo se relaciona à miscelânea geológica e às distintas resistências das rochas frente aos agentes intempéricos.

Frisa-se que as bacias dos rios Tibagi e Itararé contemplam uma pequena porção a montante com tais características de relevo com morros dissecados e elevados. Em contraste, as áreas mais planas do noroeste do Primeiro Planalto, que se encontram sobre o Complexo Granítico Cunhaporanga (MINEROPAR, 2001), de idade Paleozoica, com extensas planícies fluviais sobrepostas (ii), foram modeladas adequadamente com todas as feições características desse ambiente.

Como ilustração, a FIGURA 39AB destaca as adjacências do rio Maracanã, afluente do rio Iapó (que, na sequência, adentra o Segundo Planalto pelo Cânion Quartelá). O recorte, com as fotografias A e B, representa o padrão do mapeamento sob a litologia supracitada: amplas porções de morfogênese fluvial construtiva, atribuídas como planícies de inundação que podem se prolongar por muitos quilômetros (B), intercaladas com topos convexos em relevo colinoso, que se estendem poucos metros acima do nível de base local, e que estão associados a antigos níveis de terraços. Os vales, em decorrência, são planos.

FIGURA 39 - MAPEAMENTO NA REGIÃO DE CASTRO.



FONTE: o autor (2019)

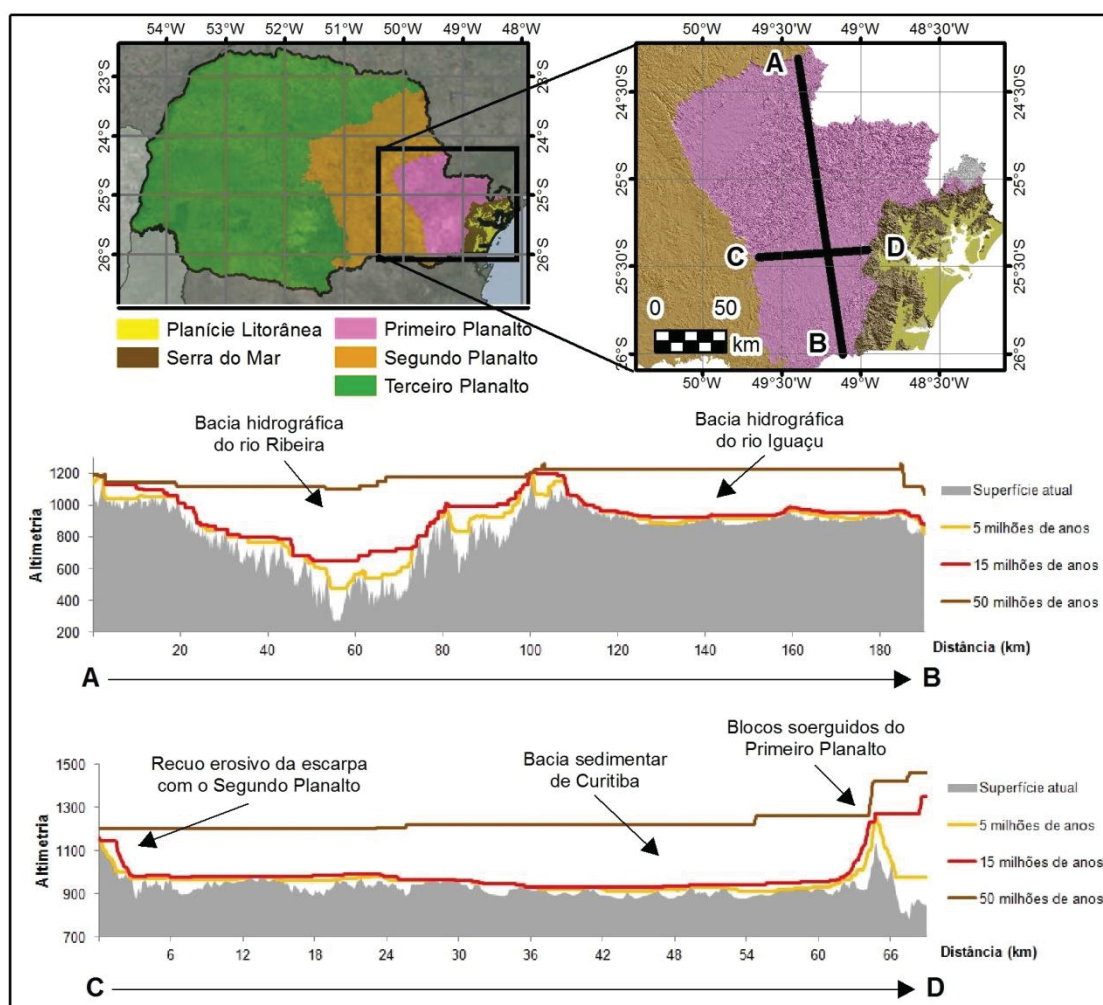
Por fim, a porção compreendida pelo Grupo Castro (iii), que configura uma associação vulcânica ácida (MINEROPAR, 2001), apresenta maior equilíbrio no balanço entre as feições construtivas e destrutivas. Como apresentado na FIGURA 39C, que evidencia o Arroio Tabuão, também afluente do rio Iapó, há uma variedade maior de objetos mapeados. Os topos convexos são mais elevados — como transcrito pela altimetria acima do nível de base nos remanescentes de terraços níveis de paleosuperfícies — e, assim, há áreas deposicionais pronunciadas. Os desníveis produzem vales predominantemente abertos, com planícies de inundação mais confinadas e que gradativamente aumentam de tamanho quanto mais próximas do afluente principal.

Referente à representação da morfocronologia, a FIGURA 40 evidencia dois perfis topográficos com as paleosuperfícies modeladas no Primeiro Planalto. O perfil A-B reforça as variações de relevo na bacia hidrográfica do rio Ribeira, a norte, e do rio Iguaçu, a sul, com destaque para a dissecação registrada nos últimos 15 milhões de anos. A partir da subtração entre o modelo da Ps_2 e o MDT da superfície atual se obteve o resultado de denudação média de 15,3 m/Ma no Ribeira e 4 m/Ma no Iguaçu. Já o perfil C-D representa a bacia sedimentar de Curitiba em relação às transições morfoestruturais a leste, com os blocos soerguidos da Serra do Mar, e a oeste, com a escarpa do Purunã (Serra da Esperança) que marca o início da bacia sedimentar do Paraná. Conforme ilustrado, a paleosuperfície mais antiga, de 50 milhões de anos (Ps_3), está condicionada às porções de cimeira das grandes unidades morfoestruturais mencionadas, que muitos autores relacionam à Superfície Sul-Americana (KING, 1956; VALADÃO, 1998), de idade eocênica-oligocênica, também denominada de Pd_3 (BIGARELLA *et al.*, 1965), Superfície Purunã (AB'SABER e BIGARELLA, 1961) e Superfície Japi (ALMEIDA, 1964).

Bigarella *et al.* (1965) atribuíram as superfícies aplanadas do Primeiro Planalto do Paraná a processos morfoclimáticos com alternância de climas úmidos e secos, formando pediplanos (Pd_3 , Pd_2 e Pd_1) com níveis de pedimentos embutidos (P_2 e P_1). Para Salamuni *et al.* (2013), as deformações das várias superfícies de aplanamento no Primeiro Planalto foram condicionadas inicialmente por processos tectônicos para, na sequência, sofrer os efeitos morfoclimáticos da erosão lateral de acordo com a predominância climática entre o fim do Paleógeno e o Holoceno. Por considerar a origem poligenética das superfícies de erosão, conforme já apresentado, na presente tese os pediplanos foram interpretados como

paleosuperfícies e os pedimentos como níveis de terraços. Apesar da distinção na nomenclatura, manteve-se a correlação temporal para a modelagem.

FIGURA 40 - PERFIL DE PALEOSUPERFÍCIES NO PRIMEIRO PLANALTO



FONTE: o autor (2019)

Nessa perspectiva, a Ps_3 foi corretamente mapeada nos principais topos do Primeiro Planalto associada às características morfoestruturais regionais (Serra do Mar e Bacia Sedimentar do Paraná). Para essa paleosuperfície, não foram identificados remanescentes planos, cujos testemunhos se limitam às cotas altimétricas dos maiores picos sustentados por litologias resistentes à erosão diferencial.

A Ps_2 , no entanto, apresentou muitos remanescentes planos na região de Castro, noroeste do Primeiro Planalto, nos divisores do rio Iapó, e também na região de Curitiba, nos divisores do rio Iguaçu. Constatou-se que a Ps_2 foi modelada nas adjacências das duas maiores planícies fluviais do Primeiro Planalto. Esses

resultados são condizentes às interpretações de estudos prévios, pois Bigarella *et al.* (1965) e Bigarella (2007) associaram a Pd₂ às superfícies intermontanas e, conforme Stefanello *et al.* (2012), os depósitos da Formação Guabirota (depositados em um intervalo de 23 a 1,8 Ma) são correlativos desse pediplano. Na região de Curitiba, todos os remanescentes planos da Ps₂ foram mapeados de modo sobreposto à Formação Guabirota. Além dos topos planos preservados, a Ps₂ foi atribuída em muitos topos secundários dos blocos graníticos soerguidos e nos divisores das sub-bacias hidrográficas do rio Ribeira.

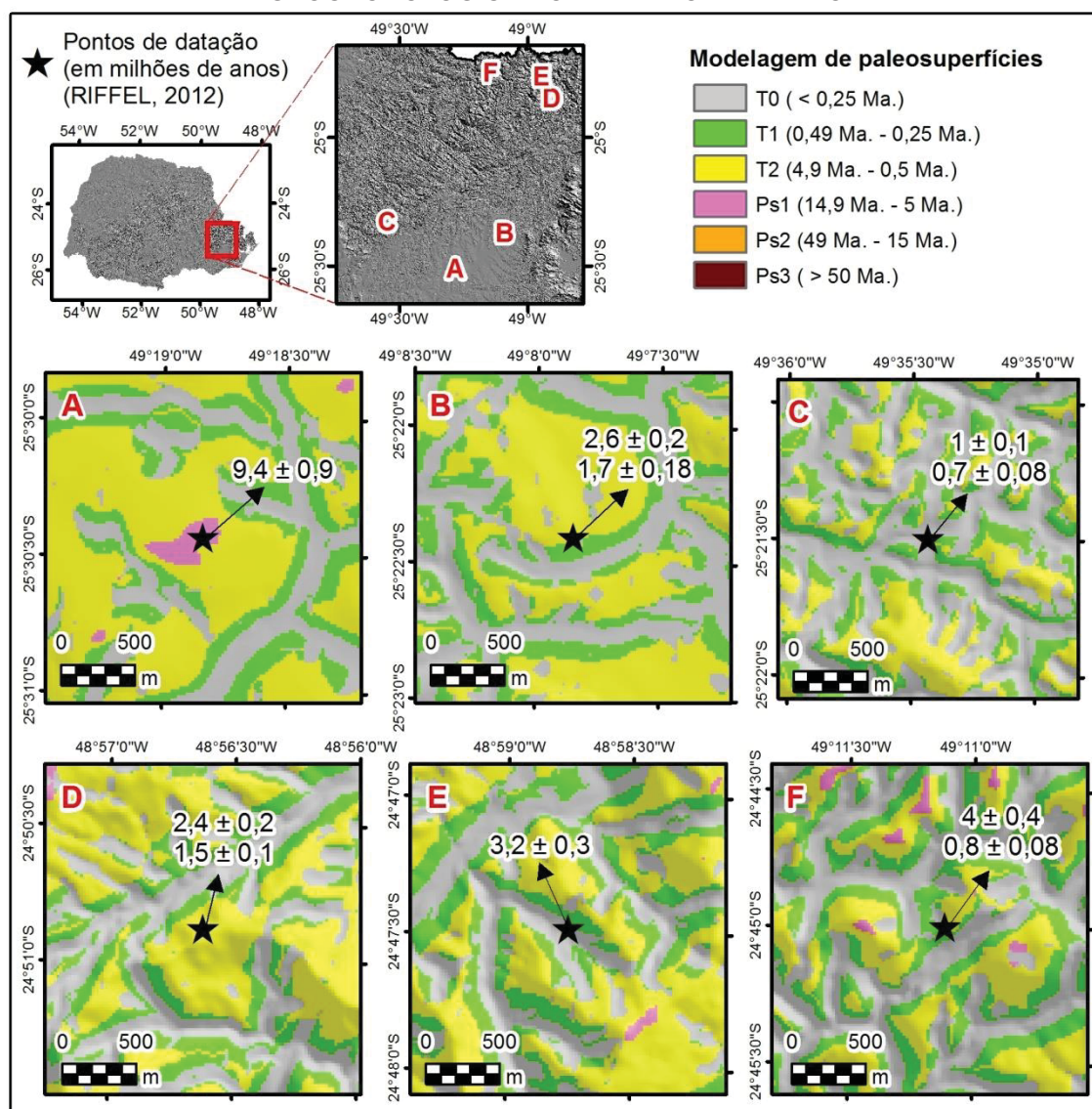
Referente à Ps₁, compreendida como uma superfície formada em depressões interplanálticas (BIGARELLA *et al.*, 1965; BIGARELLA, 2007), os remanescentes planos se concentraram nos divisores de tributários dos rios Iapó e Iguaçu. O mapeamento de remanescentes em posições inferiores à Ps₂, com a manutenção no padrão de distribuição das feições, indicou o correto mapeamento (teórico, *a priori*) por considerar que a formação de uma paleosuperfície está condicionada ao retrabalhamento do material de superfícies de erosão que a antecederam, evidenciadas pela evolução do sistema de drenagem. Como exemplo, Stefanello *et al.* (2012) citam que a Formação Tinguis, na região de Curitiba, considerada uma sequência retrabalhada da Formação Guabirota, foi correlacionada ao pediplano Pd₁ e aos pedimentos P₂ e P₁.

De todas as paleosuperfícies, a que registrou o maior número de remanescentes planos foi a T₂ (equivalente a P₂), interpretadas como níveis de terraços da última incisão de drenagem sobre a Ps₁. Também foi o nível de paleosuperfície predominante indicado nos topos do Primeiro Planalto, sendo que a T₁ representou o alargamento e aprofundamento dos vales. Conforme Bigarella *et al.* (1965), as oscilações climáticas promoveram um processo policíclico de erosão, deixando no relevo testemunhos em forma de patamares, ombreiras e terraços. Todos os remanescentes citados podem ser observados no mapa do APÊNDICE 3.

Em aspectos geocronológicos, a comparação dos resultados da modelagem de paleosuperfícies com a datação realizada por Riffel (2012) no Primeiro Planalto demonstrou correlação. Como ilustra a FIGURA 41, o ponto A, num topo da Formação Guabirota, em Curitiba foi datado com $9,4 \pm 0,9$ Ma e a paleosuperfície correspondente indicou 5 Ma (Ps₁), podendo variar até 14,9 milhões de anos (que marca o limite cronológico da paleosuperfície de nível superior, Ps₂). A datação dos pontos B, D e F (esses dois últimos na bacia do rio Ribeira) também foram

condizentes com os resultados da modelagem, correspondentes à paleosuperfície T_2 , de 500 mil anos, que pode variar até o limite de 4,9 milhões de anos (transição para a Ps_1). Os pontos C e E, por se localizarem próximos aos vales de uma região com intensa dissecação, foram superestimados pela modelagem, com erros de 200 mil anos (C) e 1,4 milhões de anos (E). No entanto, ao se considerar a classe das paleosuperfícies nos topos das vertentes em que os pontos foram datados, como é apresentado no mapa geomorfológico, todas as datações realizadas por Riffel (2012) equivalem à modelagem realizada (inclusive os pontos C e E).

FIGURA 41 - MODELAGEM DE PALEOSUPERFÍCIES E PONTOS DE DATAÇÃO GEOCRONOLÓGICA NO PRIMEIRO PLANALTO



FONTE: o autor (2019)

Como consequência da heterogeneidade do relevo entre a porção norte e sul do Primeiro Planalto, denotada por todos os aspectos geomorfológicos discutidos até aqui, a morfodinâmica também se mostrou mais intensa na bacia do rio Ribeira, corroborada tanto pela interpretação de itens afins (como os processos morfogenéticos) quanto pela própria quantificação de objetos específicos. Dos 79 pontos mapeados como suscetíveis à corrida de detritos no Primeiro Planalto (que representam 35,2% do total de pontos suscetíveis no estado), 74 localizaram-se a norte e noroeste, sendo que os 5 pontos a sul estão no contato com as montanhas da Serra do Mar.

4.2.4 Segundo Planalto

O mapeamento do Segundo Planalto, que compreende 22,5% (44978 km²) da área do estado e marca o início da bacia sedimentar paleozoica no Paraná, representou de modo adequado as principais características geomorfológicas desse grande compartimento estrutural. Os objetos mapeados foram condizentes às características e variações litológicas associadas às sucessões sedimentares definidas por ciclos transgressivo-regressivos ligados às oscilações do nível relativo do mar no Paleozoico. O controle de campo contou com 72 pontos de análise e 1240 quilômetros percorridos com acompanhamento em tempo real.

As principais diferenciações geomórficas estão vinculadas aos seguintes Grupos do mapa geológico do Paraná, publicado pela Mineropar (2001): Grupo Paraná (Devoniano), Grupo Itararé (Carbonífero-Permiano Inferior), Grupo Guatá (Permiano Médio) e Grupo Passa Dois (Permiano Superior), além das estruturas vinculadas às rochas intrusivas básicas (Cretáceo) — como representado na FIGURA 2. Cada Grupo, com suas especificidades sobre o ambiente deposicional que originou as camadas sedimentares, influenciou na configuração e evolução do relevo na bacia e, como consequência, tais aspectos geomorfológicos foram corroborados pelos objetos modelados e representados no mapa geomorfológico produzido.

De modo simplificado, a TABELA 20 apresenta os resultados quantificados dos principais objetos geomorfológicos modelados em relação aos Grupos geológicos mencionados que constituem o Segundo Planalto Paranaense e que serão detalhados a seguir. Apesar de generalizados, já que há uma grande

diversidade dentro de cada Grupo, os valores tabelados demonstram particularidades da constituição do relevo local.

TABELA 20 - 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	

FONTE: o autor (2019)

Inicialmente, faz-se necessário evidenciar os resultados do mapeamento na transição morfoestrutural entre o Primeiro e o Segundo Planalto, sobretudo devido à presença de uma extensa escarpa que aparece pronunciada na paisagem num segmento de quase 400 km (dentro dos limites do estado do Paraná). Essa feição — denominada popularmente como "Escarpa Devoniana" por causa da Formação Furnas (arenito) pertencente a esse período geológico, mas que, sob a perspectiva morfológica, foi moldada a partir do processo de abertura do Oceano Atlântico com o *rift* continental, já no período Cretáceo — encontra-se em recuo erosivo, já que o mergulho das camadas na bacia sedimentar decresce gradativamente para oeste.

A FIGURA 42 e FIGURA 43, em São Luiz do Purunã e Jaguariaíva, respectivamente, ilustram o mapeamento em segmentos da escarpa 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. O APÊNDICE 4, com a carta Campo Largo, detalha um segmento da escarpa em São Luiz do Purunã.

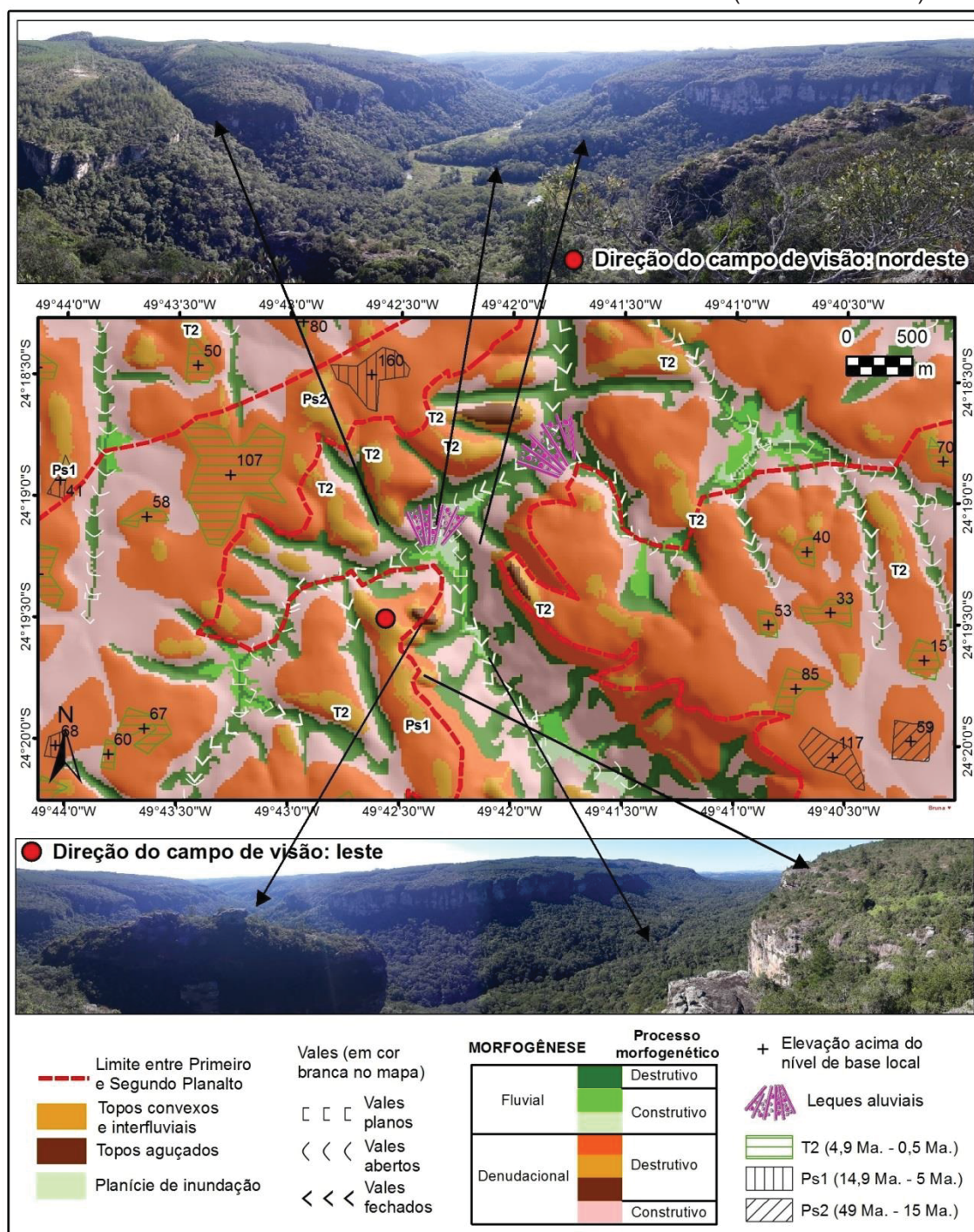
Ainda no *front* da escarpa, o sistema de drenagem instalado no rebordo, com vertentes convergentes, que provoca o recuo erosivo da feição, foi corretamente atribuído à morfogênese fluvial destrutiva — com áreas construtivas confinadas nos fundos de vale (normalmente abertos, em "U") das porções mais planas, já alocadas no Primeiro Planalto.

No reverso da escarpa, a mudança de relevo é abrupta. A resistência do Arenito Furnas dificulta a incisão fluvial acentuada, formando vales planos ou abertos, como destacado no mapeamento. Prevalece, 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 43 ilustra um morro testemunho com topo aguçado em meio às reentrâncias da escarpa.

Em decorrência da resistência erosiva, as porções superiores da escarpa preservam muitos remanescentes de paleosuperfícies. Em São Luiz do Purunã (FIGURA 42 ou APÊNDICE 4), a modelagem destacou testemunhos da Ps₃ (50 Ma), o que faz jus às interpretações dos trabalhos já mencionados que associam essa porção aos níveis de cimeira da Superfície Sul-Americana (KING, 1956; VALADÃO, 1998), Superfície Purunã (AB'SABER e BIGARELLA, 1961) ou do pediplano Pd₃ de Bigarella *et al.* (1965; 1978) — que, a leste, tem continuidade correlata nos topos graníticos da Serra do Mar.

O arenito da Formação Furnas, de origem aluvial e litorânea, conta com a presença de caulinita. A cimentação desse mineral torna a rocha resistente à erosão, o que explica a manutenção da cornija da escarpa. A Formação Ponta Grossa, também do Grupo Paraná, originada por depósitos litorâneos e de plataforma (MINEROPAR, 2001), evidenciou resultados semelhantes aos valores quantificados para a Formação Furnas, como exposto na TABELA 20.

FIGURA 43 - MAPEAMENTO NA ESCARPA DE JAGUARIAÍVA (VALE DO CODÓ)



FONTE: o autor (2019)

Na região de Jaguariáiva (FIGURA 43), pelo fato do reverso da escarpa apresentar uma variação maior na altitude, além de alguns remanescentes da Ps₃ o predomínio foi de feições vinculadas à Ps₂ (entre 49 Ma até 15 Ma) e, quanto mais próximo dos vales fechados com cânions estruturais, também de antigos terraços, sobretudo T₂. Nessa mesma ilustração, que destaca o Vale do Codó, a dinâmica do

processo evolutivo da linha de escarpa é reforçada pela presença de cones de dejeção, com quebras de declive, e de planícies de inundação, cujos limites são perceptíveis pela vegetação característica de áreas alagadiças.

Comparativamente ao Grupo Paraná, em direção ao interior da bacia sedimentar, a oeste, o mapeamento detectou uma diferença significativa nas características do relevo no Grupo Itararé, que compreende, conforme Mineropar (2001), as seguintes formações: Rio do Sul (derivada de ambientes litorâneos de plataforma periglacial e deltáica), Mafra (depósitos de planície litorânea e de plataforma periglacial) e Campo do Tenente (depósitos fluvioglaciais).

Por ser uma extensa unidade geológica — quatro vezes maior que a Serra do Mar —, os resultados quantificados, gerais, não demonstram as variações existentes dentro do próprio Grupo. Como consta na TABELA 20, a principal diferença se refere ao aumento na densidade de drenagem e das feições decorrentes, ainda que predomine o relevo colinoso típico da região que dá nome aos Campos Gerais.

Assim, sob o Itararé, o mapeamento ressaltou o predomínio de vales abertos, já que o entalhamento fluvial segue a suavidade das colinas. A declividade média resultante na porção, aliás, foi calculada em 13,4% — apenas 1% maior do que na Formação Furnas. Por outro lado, a porcentagem relativa de área ocupada por topos convexos foi três vezes maior, enquanto o número de terraços e remanescentes de paleosuperfícies caiu pela metade. Esse padrão indica que os divisores de água passam a ter maior convexidade por causa do aumento na densidade de drenagem.

Por não ter uma resistência tão grande quanto o Arenito Furnas, a modelagem estimou que a superfície sobre o Grupo Itararé foi erodida, em média, 42,8 metros nos últimos 5 milhões de anos (mais de 7 metros do que a denudação modelada nas camadas sedimentares subjacentes da bacia). No tocante à morfocronologia, indicada nos topos, prevaleceram as idades inferiores à Ps₂ (< 49 Ma), em sua maioria terraços da T₂ (4,9 Ma até 0,5 Ma).

A FIGURA 44 ilustra duas áreas, nos municípios de Tibagi (A) e Palmeira (B), com o relevo peculiar à região. O próprio uso do solo faz jus às feições mapeadas. No primeiro recorte (A), a morfogênese fluvial é facilmente identificada pela vegetação ripária, enquanto a morfogênese denudacional é aproveitada para a

agricultura. No segundo recorte (B), os extensos topos suaves caracterizaram áreas denudacionais e as vertentes convergentes foram associadas à morfogênese fluvial.

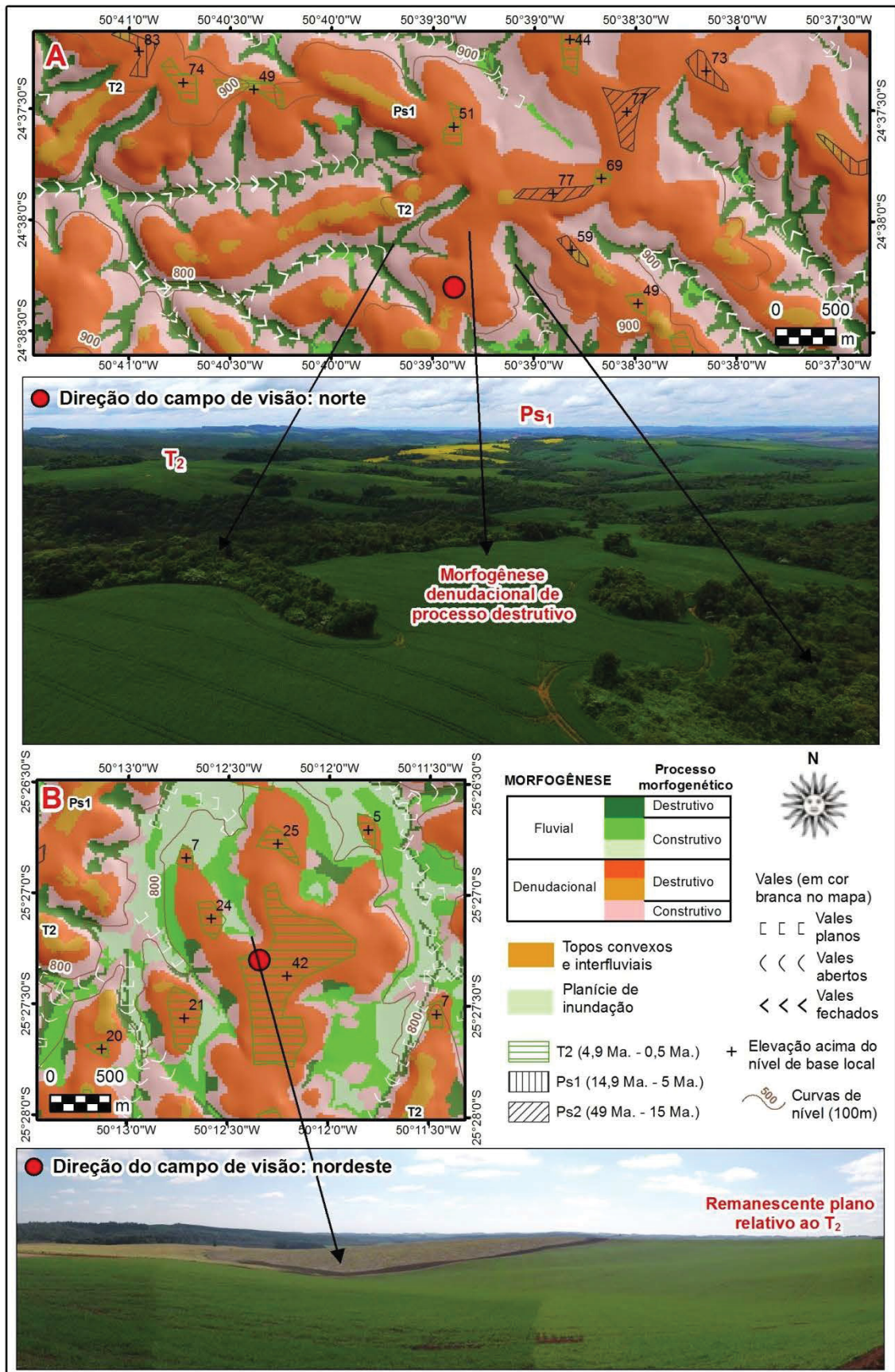
A assinatura geomorfométrica dos objetos teve correspondência às observações de campo. No recorte da FIGURA 44A, localizada numa porção mais alta e de maior potencial erosivo, os vales foram identificados com segmentos ora fechados e ora abertos — intercalados, muitas vezes. Nas porções inferiores das bacias hidrográficas, com a mudança na relação erosão / deposição, predominaram vales ora abertos e ora planos, tal como consta na FIGURA 44B, com destacadas porções morfogenéticas fluviais construtivas.

Em aspectos gerais, mesmo com o distanciamento entre as curvas de nível em áreas com padrão colinoso, a parametrização do relevo foi eficiente na delimitação das feições — ainda que os limites das planícies de inundação, em alguns casos, possam ser considerados como superestimados. Como apresentado na FIGURA 44B, algumas porções das planícies acabam adentrando as vertentes convexas, já no terço médio. Isso se deve à escala da base planialtimétrica, pois se a equidistância entre as curvas de nível fosse menor, a quebra de declive seria detectada e, como consequência, o limite das planícies seria refinado.

No Grupo Guatá (Perminiano Médio), com as Formações Palermo e Rio Bonito, depositados em ambiente litorâneo e de plataforma (MINEROPAR, 2001), as principais diferenças quantitativas do mapeamento em relação às demais unidades geológicas do Segundo Planalto se referem à menor densidade de vales fechados, com média de 160 m / km², e grande proporção de área relativa ocupada por planícies de inundação, com 4,3% — praticamente o dobro de ocorrência se comparado aos Grupos Paraná e Itararé. A declividade média, por sua vez, teve valor semelhante: 11,7% (TABELA 20).

Observou-se que quanto mais a oeste e quanto mais próximo do eixo central do Arco de Ponta Grossa, mais significativa é a influência das rochas intrusivas básicas que se sobrepõem às formações sedimentares, na paisagem, como altos topográficos. Se na borda leste da bacia sedimentar a erosão diferencial expôs vales encaixados, todos devidamente mapeados, no rebordo oeste tais intrusões magmáticas caracterizaram topos alinhados, normalmente aguçados e no sentido NW-SE (no caso dos diques de diabásio). Regionalmente, esse contato litológico altera o padrão predominante colinoso para descontinuidades com morros e morrotes.

FIGURA 44 - MAPEAMENTO NA REGIÃO DE PONTA GROSSA



FONTE: o autor (2019)

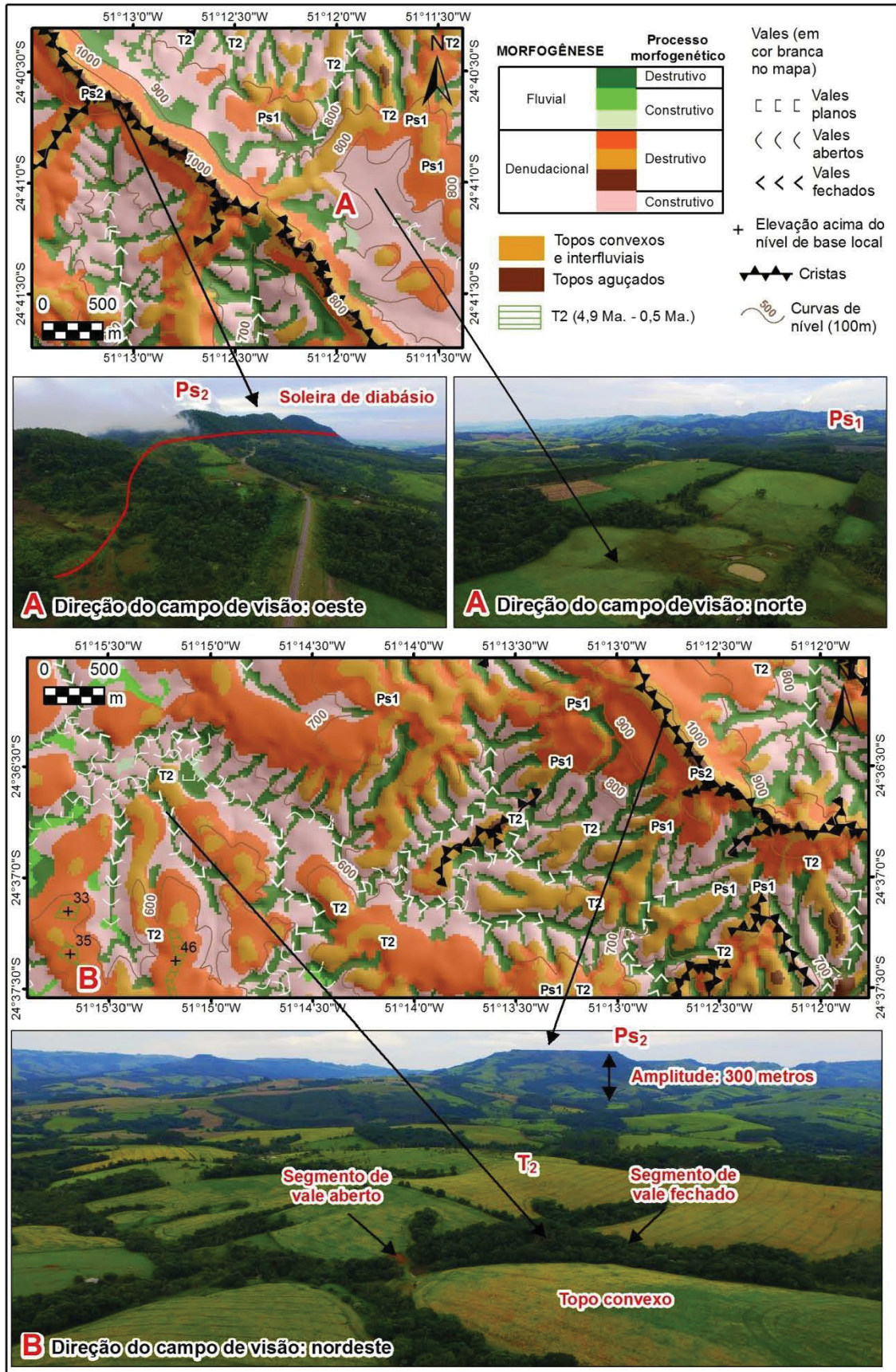
A proximidade com os derrames basálticos que recobrem a bacia sedimentar do Paraná e que, estruturalmente, marcam o início do Terceiro Planalto, provocou uma gradativa mudança de relevo corroborada pelo mapeamento. No Segundo Planalto, portanto, o último ciclo deposicional vinculado às oscilações transgressivo-regressivas do nível relativo do mar (MILANI *et al.*, 2007), no Permiano Superior, compreende o Grupo Passa Dois do mapa geológico do estado do Paraná, com as formações Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto (MINEROPAR, 2001).

Nessa porção da bacia, em contraste com a relativa monotonia do restante do Segundo Planalto, há uma diversidade maior de feições geomorfológicas. Os resultados quantificados, expressos pela TABELA 20, reforçam tais características do mapeamento sobre o Grupo Passa Dois: possui maior proporção de áreas com morfogênese fluvial destrutiva; maior densidade de vales fechados e de cristas, com média de 350 m / km² e 361 m / km², respectivamente; a maior declividade média, com 15,7%; e, por fim, a maior média de taxa de denudação, com 52,6 m nos últimos 5 milhões de anos (conforme a modelagem das paleosuperfícies).

O conjunto dos resultados, com as variações acima da média geral, evidenciou o relevo mais dissecado que se observa na paisagem do Segundo Planalto. A proporção de cristas, por exemplo, foi 38 vezes superior ao mapeado na Formação Ponta Grossa. Como citado anteriormente, isso se deve, sobretudo, ao enxame paralelo de diques de diabásio que afloram na região. Destaca-se que as soleiras de diabásio não entraram nos cálculos, já que constam como unidades individualizadas no mapa geológico do Paraná. Se fossem incluídas, os valores referentes à dissecação seriam ainda maiores.

Em aspectos visuais essas evidências são ilustradas pela FIGURA 45, com intrusões básicas que se sobressaem na paisagem e que exercem influência nas relações de energia do entorno. No primeiro recorte (FIGURA 45A), 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 45B), o correto mapeamento das feições fluviais, cujos limites podem ser observados pela presença de vegetação ripária ao longo dos cursos de drenagem.

FIGURA 45 - MAPEAMENTO NA REGIÃO DE CÂNDIDO DE ABREU



FONTE: o autor (2019)

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 45B, o desnível altimétrico chega a 300 metros. Os topos vinculados às intrusões normalmente foram modelados como Ps_2 (49 Ma a 15 Ma), enquanto os topos convexos da porção sedimentar receberam atribuição majoritária da T_2 (4,9 Ma a 0,5 Ma).

Na região de Prudentópolis, notabilizada por concentrar muitas cachoeiras, a presença de rochas magmáticas imbricadas às rochas sedimentares exerce influência no relevo local. Além dos diques, as soleiras de diabásio — espraiadas horizontalmente — sustentam elevações de modo contínuo, formando "pequenos planaltos" com extensão que pode chegar à dezena de quilômetro e com muitos cones de dejeção associados. Isso ocorre, por exemplo, no Salto São João, representado pela FIGURA 46, onde há uma soleira de diabásio intraposta verticalmente no arenito da Formação Teresina e que circunda, horizontalmente, uma porção do vale do rio Ivaí e alguns afluentes num segmento sucessivo de 120 km, contabilizando as duas margens, com 16 cones de dejeção nas adjacências.

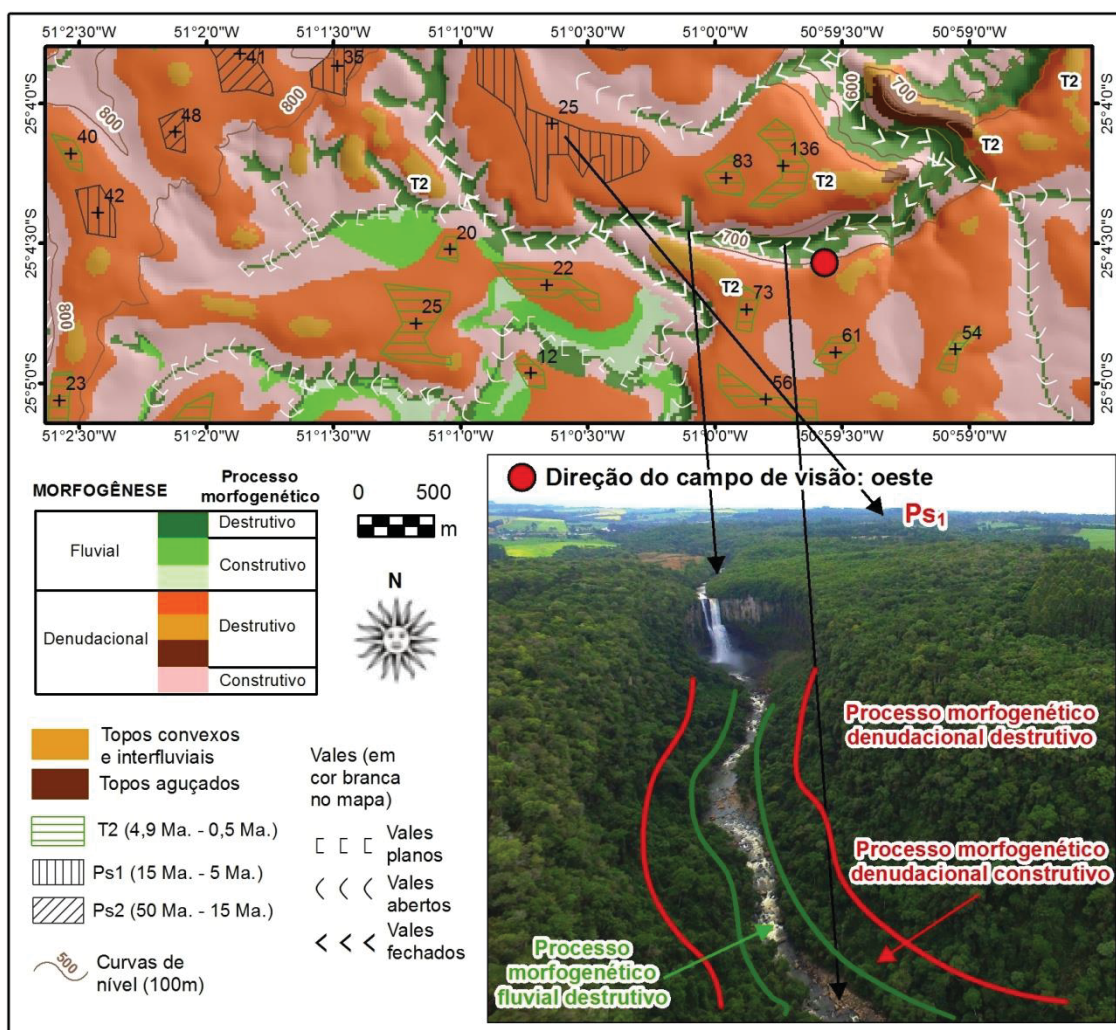
A evolução morfológica dessa área, com a presença de vertentes escarpadas e quedas d'água, pode ser explicada pelo solapamento da base (arenito), a partir das incisões fluviais, seguido da queda dos blocos de diabásio por gravidade (camada imediatamente acima). Como consequência, há o processo de erosão remontante. Ainda que o topo seja coberto novamente pelo arenito da Formação Teresina, a camada ígnea poucos metros abaixo controla o nível altimétrico e a declividade local. No mapa geomorfológico resultante essas características foram representadas com exatidão, tal como consta na FIGURA 46, incluindo os limites dos processos morfogenéticos e dos remanescentes planos das paleosuperfícies.

Embora constem, atualmente, no Segundo Planalto, tais feições associadas às intrusões magmáticas podem ser testemunhos do recuo erosivo da escarpa que marca o início do Terceiro Planalto. No mapeamento geomorfológico do estado do Paraná (SANTOS *et al.*, 2006) essa área de transição foi cartografada pela subunidade morfoescultural denominada "Planaltos residuais da formação Serra Geral".

No mapa do APÊNDICE 5, referente à carta União da Vitória, o contraste entre o relevo dissecado e as amplas planícies fluviais emblematiza a transição

litológica e morfológica. Nessa área, a erosão remontante foi pontencializada pelo rio Iguaçu, que após percorrer o Segundo Planalto sem maiores obstáculos, ao chegar no contato entre o arenito da Formação Rio do Rasto e o basalto da Formação Serra Geral encontra uma barreira natural (escarpa) que retém consideravelmente o fluxo hídrico. Como consequência, o município de União da Vitória, a montante, apresenta recorrência de inundações que trazem prejuízos severos para a população local, já que a cidade está localizada às margens do rio Iguaçu.

FIGURA 46 - MAPEAMENTO NO SALTO SÃO JOÃO EM PRUDENTÓPOLIS.



Conforme o mapeamento produzido, grande parte das áreas urbanizadas constam inseridas em áreas de processo morfogenético construtivo, ou seja, em planícies de inundação — recobertas com sedimentos holocênicos sobre a Formação Rio do Rasto. O processo evolutivo do relevo local também é destacado no mapa do APÊNDICE 5. No núcleo central dos basaltos na Formação Serra Geral

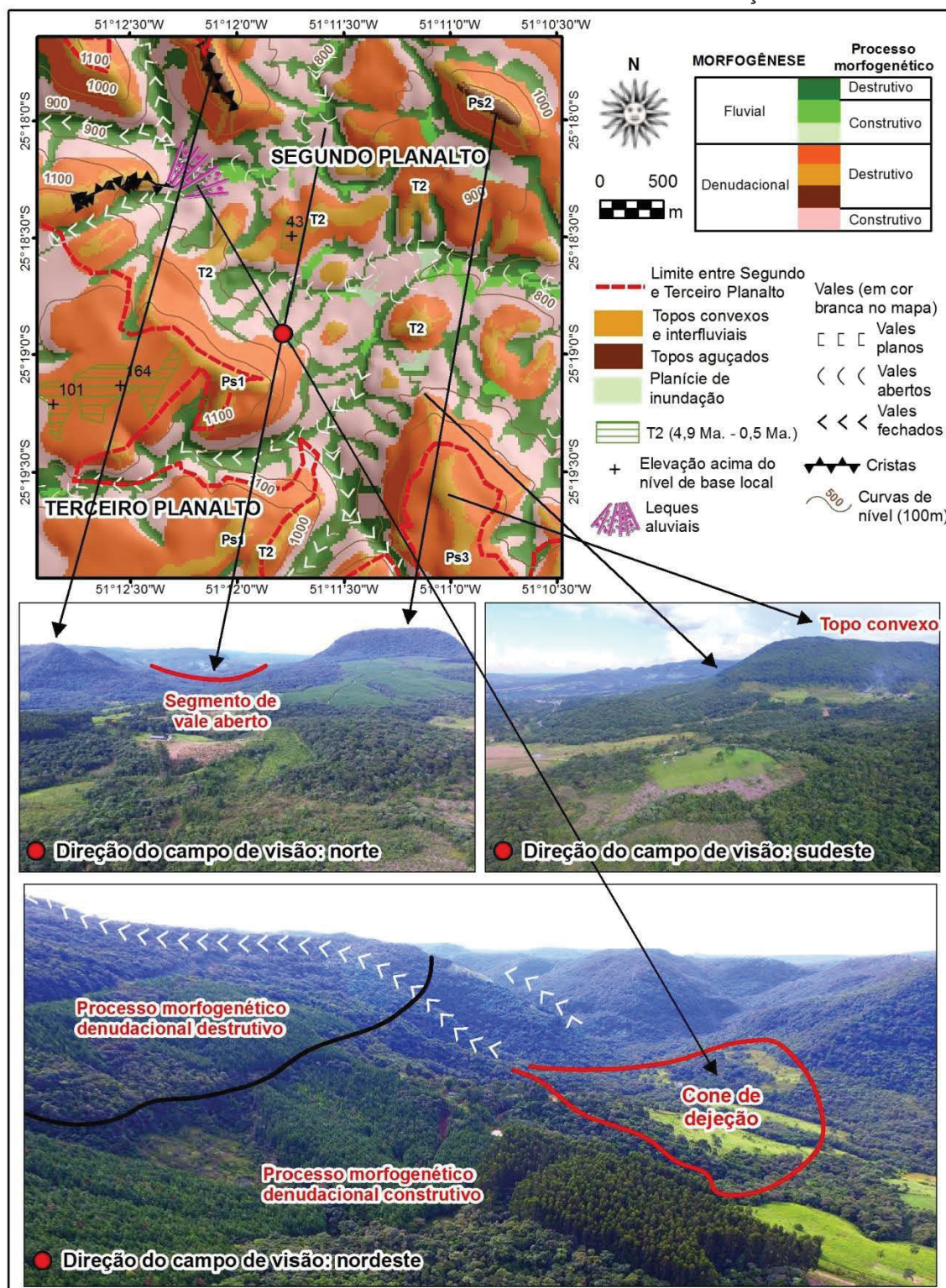
há o predomínio do processo morfogenético destrutivo, enquanto nas laterais constam muitas incisões fluviais (processo destrutivo) que atestam o potencial erosivo ativo na área — corroborado pelo encarte de erosão potencial, no qual tais vertentes foram indicadas com os maiores valores.

A denominada Serra da Esperança, entre os municípios de Prudentópolis (Segundo Planalto) e Guarapuava (Terceiro Planalto) nas proximidades da BR-277, faz parte da escarpa basáltica e, no contexto do Segundo Planalto, possui muitas feições testemunhas da Formação Serra Geral. Como ilustrado na FIGURA 47 e no mapa do APÊNDICE 6, os morros isolados constituem formas de destaque. O Morro do Chapéu é mantido por topo basáltico, que a partir da modelagem foi mapeado com topo aguçado e referente à Ps_2 (49 Ma a 15 Ma). Observe-se que esse morro apresenta uma convexidade nas vertentes intermediárias que o mapeamento corretamente atribuiu ao processo morfogenético destrutivo, ocorrendo a concavidade somente no fundo de vale, mapeado como processo fluvial destrutivo.

Nos sopés da escarpa, além do material coluvionar representado pelo processo morfogenético denudacional construtivo, há a presença de muitos cones de dejeção, tal como consta em porções transitórias de outras unidades morfoesculturais do estado (entre Serra do Mar e Planície Litorânea, Primeiro e Segundo Planalto, por exemplo). A amplitude altimétrica e a quebra de declive propiciam a formação dos cones, cujos aluviões são transportados nos vales fechados devidamente identificados no mapa. Ao adentrarem sobre as rochas sedimentares, predominam os vales abertos.

Quanto à modelagem morfocronológica do Segundo Planalto, os resultados foram concordantes às interpretações da evolução do relevo na área. No transecto A-B (FIGURA 48), que perpassa os quatro grandes Grupos geológicos de norte a sul, os maiores contrastes se devem mais às bacias hidrográficas do que às variações litológicas. No transecto C-D (FIGURA 48), entretanto, nota-se que a disposição das camadas sedimentares de leste (mais antigas) para oeste (mais recentes) exerce influência direta no padrão altimétrico devido ao processo de erosão diferencial. Em aspectos regionais, a escarpa na Formação Furnas, os divisores das grandes bacias e a escarpa basáltica sustentam as elevações equivalentes à Ps_3 (50 Ma). A linha da Ps_2 (15 Ma) marca uma fase inicial de denudação vinculada sobretudo às mudanças litológicas, enquanto a linha da Ps_1 (5 Ma) evidencia uma fase inicial da denudação dentro de cada litologia.

FIGURA 47 - MAPEAMENTO NA SERRA DA ESPERANÇA

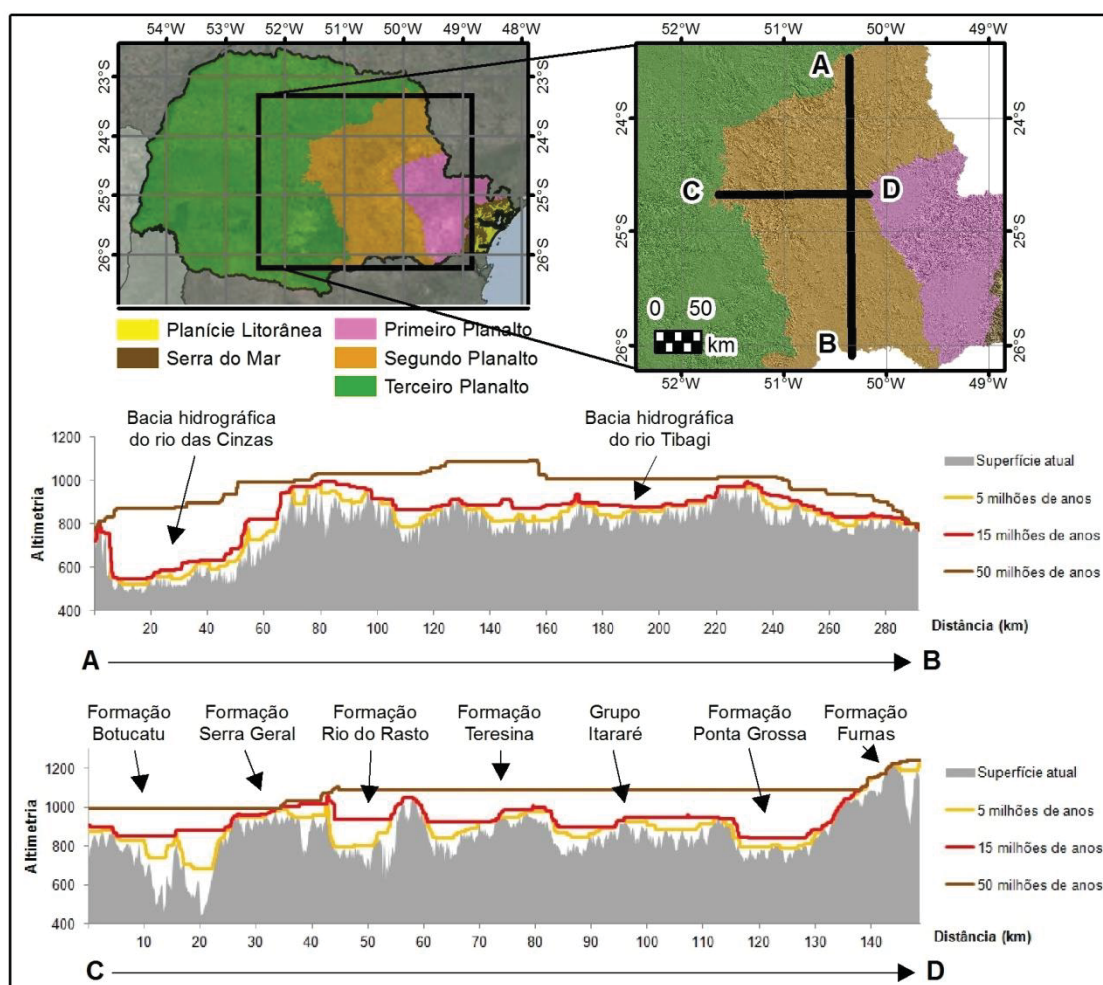


FONTE: o autor (2019)

Na comparação entre os modelos das paleosuperfícies e os pontos de datação geocronológica publicados por Riffel *et al.* (2015), os resultados apresentaram correlação. No Parque Estadual de Vila Velha (FIGURA 49A), os topos das feições ruiformes foram datados com idades que variam entre 9,5 Ma e

17,2 Ma pelo método de datação argônio-argônio. Tais feições ruiformes têm extensão de poucos metros, cujo detalhamento não foi contemplado pelo MDT utilizado (célula de 20m x 20m). Por esse motivo, os três pontos datados constam inseridos no nível da paleosuperfície T_2 (4,9 Ma - 0,5 Ma), que se refere ao relevo do entorno das feições. Todavia, ao considerar o topo preservado mais próximo (representado pela fotografia, a 600 metros do Parque), a modelagem indicou o nível da Ps_1 (14,9 Ma - 5 Ma), condizente ao intervalo da datação absoluta.

FIGURA 48 - PERFIL DE PALEOSUPERFÍCIES NO SEGUNDO PLANALTO

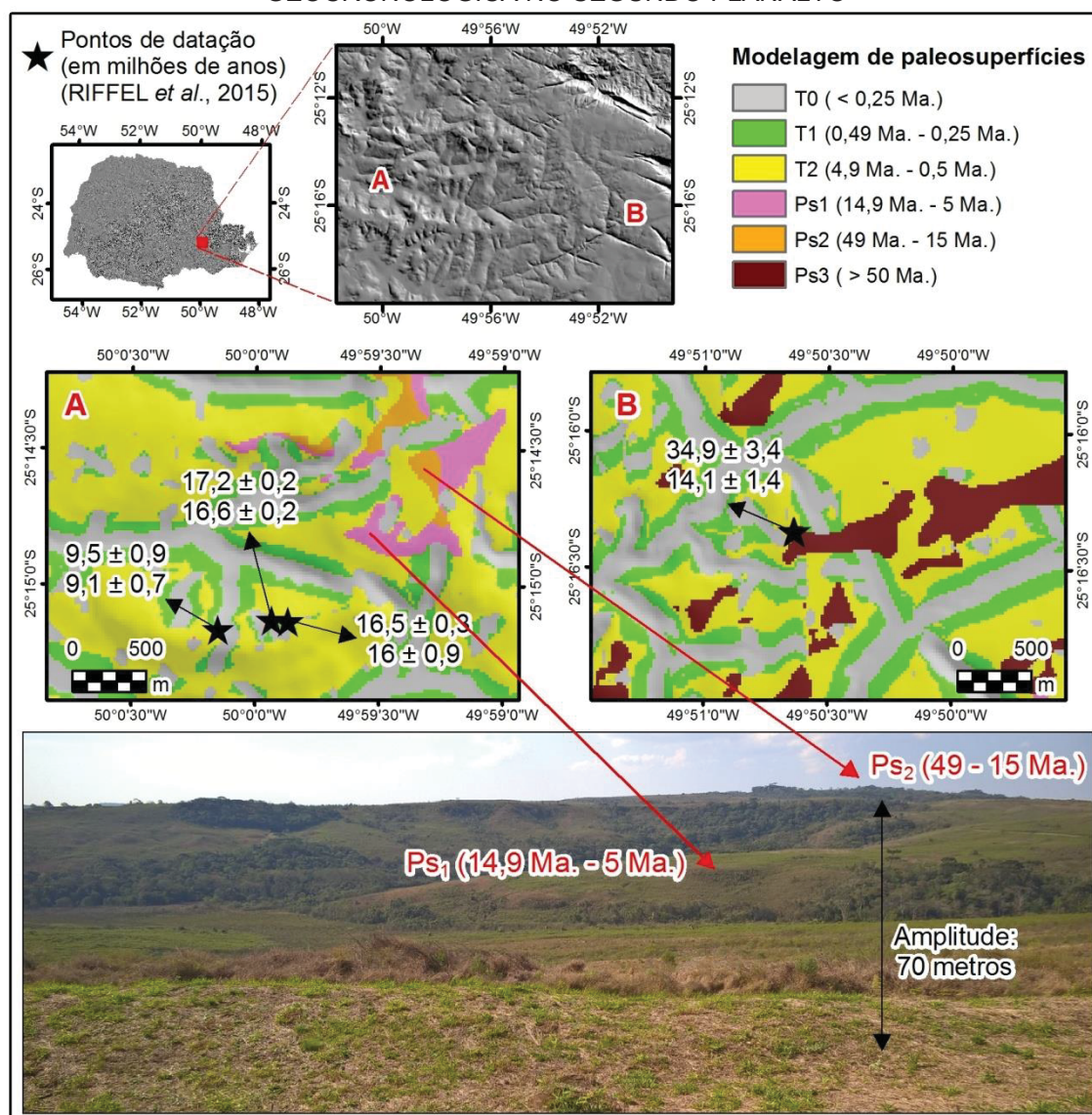


FONTE: o autor (2019)

Na datação realizada num perfil laterítico da Serra das Almas (próxima à escarpa com o Primeiro Planalto), Riffel *et al.* (2015) obtiveram, em dois pontos, as idades de 34,9 Ma a 14,1 Ma. No modelo, os pontos constam na Ps_3 (> 50 Ma), mas já na transição para a T_2 (4,9 Ma - 0,5 Ma), como ilustrado pela FIGURA 49B. Assim, pelo fato dos pontos estarem na borda dos limites das paleosuperfícies mapeadas,

considera-se que o resultado obtido é coerente e plausível. Os pontos datados estão localizados a 3 km de distância do *front* da escarpa, na qual o reverso preserva os remanescentes da paleosuperfície mais antiga segundo os modelos teóricos, como proposto por Ab'Sáber e Bigarella (1961).

FIGURA 49 - MODELAGEM DE PALEOSUPERFÍCIES E PONTOS DE DATAÇÃO GEOCRONOLÓGICA NO SEGUNDO PLANALTO



FONTE: o autor (2019)

4.2.5 Terceiro Planalto

O Terceiro Planalto ocupa 65% do território paranaense, com uma área de 130000 km². Por ser a mais extensa das unidades mofoescolturaes do estado, alguns recortes representativos foram selecionados para exemplificar as características do

relevo na área a partir dos resultados do mapeamento geomorfológico realizado. As etapas de campo contabilizaram 133 pontos de análise e 2250 quilômetros percorridos com acompanhamento em tempo real.

A gênese desse grande compartimento geomorfológico se restitui aos fenômenos que levaram ao *rift* continental de Gondwana (com a abertura do Oceano Atlântico), durante o Cretáceo, com o decorrente evento vulcânico reconhecido como aquele de maior expressividade e grandeza na história da Terra. 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, p. 276), 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. Rememora-se que os diques aparecem representados em todos os compartimentos geomorfológicos do estado. Os derrames mesozoicos, entretanto, são exclusivos do Terceiro Planalto, enquanto as soleiras de diabásio exercem influência também no Segundo Planalto (conforme já apresentado).

Faz-se necessário retomar essa caracterização da área para embasar a discussão sobre os resultados do mapeamento, já que, desde os trabalhos pioneiros sobre o relevo paranaense, as descrições sobre o Terceiro Planalto são exíguas — muitas das quais se limitam a descrevê-lo como relevo monótono em função da litologia homogênea. Entretanto, como será demonstrado, há diferenças importantes nas características dos derrames que alteram a estrutura interna do material ígneo e, por conseguinte, alteram as estruturas superficiais.

Os derrames que recobrem o Terceiro Planalto constituem a Formação Serra Geral, caracterizada por uma sucessão de derrames com uma espessura máxima de cerca de 1700 metros (WAICHEL *et al.*, 2006). Ainda que 77% do Terceiro Planalto (50% do estado do Paraná) seja recoberto pela Formação Serra Geral, com predominância de basaltos (MINEROPAR, 2001), o mencionado evento vulcânico possui fases e particularidades que tornam seu arranjo bastante heterogêneo: características das erupções hidrovulcânicas e dos eventos explosivos em centros eruptivos, depósitos de quedas das cinzas vulcânicas, interdigitação de

produtos (como derrames, vulcanoclastos e piroclastos) e a própria sucessão dos depósitos vulcanoclásticos.

Em estudo realizado na porção oeste paranaense, na Formação Serra Geral, Waichel *et al.* (2006b) identificaram predominância de derrames do tipo *pahoehoe*³ (associados com derrames maciços), que “exibem características típicas de fluxos inflados como: a estruturação interna (zona superior, núcleo e zona inferior); fraturas geradas pela inflação na zona superior, por vezes preenchidas por injeções de lava (*squeeze-ups*) e pela presença de lobos pouco espessos na porção frontal de derrames inflados” (p. 130).

Sobreposto aos derrames basálticos, na região noroeste do estado do Paraná consta uma cobertura sedimentar arenosa (dunas eólicas desérticas) depositada em ambiente árido no final do Cretáceo, correspondente ao Grupo Bauru, com predomínio da Formação Caiuá (18% do Terceiro Planalto e 11,7% do Paraná), segundo o mapeamento geológico publicado pela Mineropar (2001). Tal cobertura sedimentar condiciona uma série de processos geomorfológicos na região, detalhados adiante.

De modo geral, ao contrário de outros compartimentos morfoesculturais do estado do Paraná, as mudanças de relevo no Terceiro Planalto não podem ser interpretadas considerando somente os efeitos da erosão diferencial e/ou das bacias hidrográficas. Ou seja, o compartimento geomorfológico tido como simplificado é, na realidade, muito complexo devido às características pontuais que se justificam por um conjunto de fatores (dentre os quais a própria erosão diferencial e as bacias hidrográficas).

Como destacado pelo capítulo anterior (4.2.4), a escarpa basáltica que delimita o Terceiro Planalto está em recuo erosivo, sobretudo pelas rochas sedimentares subjacentes aos derrames, das Formações Pirambóia e Botucatu, que possuem menor resistência.

Ao adentrar a Formação Serra Geral, cabe salientar, por fim, uma subdivisão proposta por Arioli (2008) em quatro associações faciológicas que têm relação direta com os resultados obtidos na modelagem: i) derrames lobados de basalto vesicular e brechas vulcanoclásticas (com abundantes intercalações vulcanoclásticas e

³ “Derrame de lava basáltica fluida e que solidifica formando uma estrutura que se enrola a semelhança de um rolo de corda” (WINGE *et al.*, 2001).

sedimentares de pequenos volumes de lava e baixas taxas de erupção); ii) derrames tabulares de basalto maciço (fase de vulcanismo fissural, com grandes volumes de lava e altas taxas de erupção); iii) diques e soleiras de diabásio; iv) associação de rochas ácidas e intermediárias.

Conforme a modelagem realizada, o Terceiro Planalto possui declividade média de 10,6%, baixa proporção de topos aguçados (apenas 0,3% da área total) e, conseqüentemente, baixa densidade de segmentos de cristas (média de 55 m/km²). Entretanto, 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 supracitadas da Formação Serra Geral.

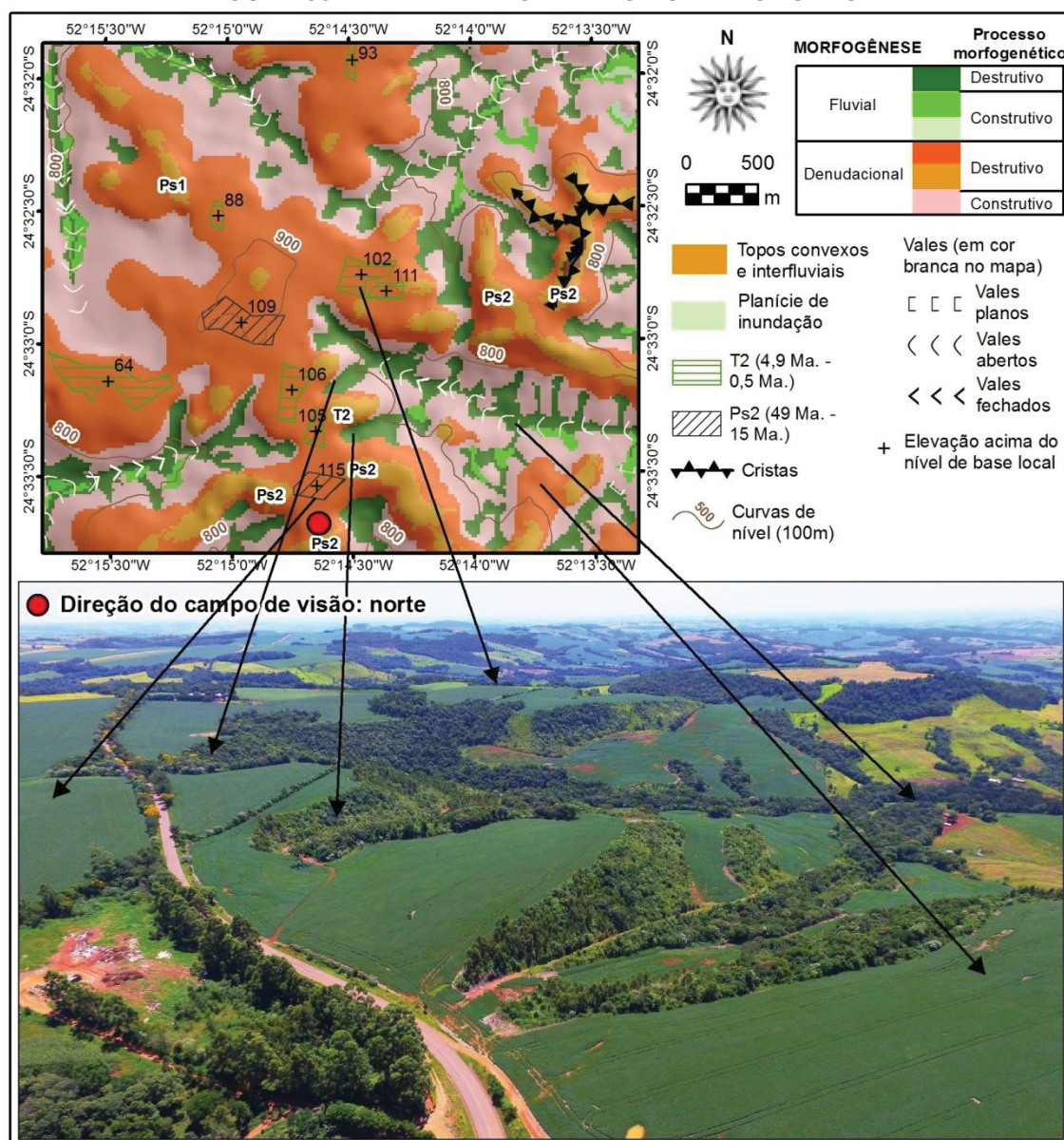
Em muitos casos, as porções com morfogênese denudacional destrutiva (incluindo os topos) podem ser vinculadas aos depósitos vulcanoclásticos, que por serem mais resistentes formam altos topográficos. As rupturas de declive normalmente estão associadas aos derrames de lavas intercalados e às interdigitações 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.

O recorte da FIGURA 50 ilustra uma paisagem com predomínio de morfogênese destrutiva, principalmente fluvial. A área está localizada nos divisores da margem esquerda do terço médio da bacia hidrográfica do rio Ivaí (município de Roncador), a apenas 750 metros da bacia hidrográfica do rio Piquiri. Trata-se, portanto, de uma porção alta em relação ao contexto regional — com atribuições à Ps₂ —, cujo desnível propicia maior dissecação do relevo e, ao mesmo tempo, justifica as extensas áreas denudacionais destrutivas mais resistentes à erosão. Ressalta-se a correta delimitação das feições pela modelagem, especialmente em relação às fluviais, como indicado na fotografia.

Ao sair das porções dos divisores e seguir, longitudinalmente, em direção ao canal principal (rio Ivaí, ainda no terço médio da bacia), observa-se uma significativa mudança no padrão de relevo, com um relativo equilíbrio entre as forças agradacionais e deposicionais. A FIGURA 51, no município de Iretama, exemplifica essa característica. Comparando-a com a porção nos divisores da bacia hidrográfica (FIGURA 50), nota-se que a extensão das áreas denudacionais diminui,

ocasionando, inclusive, segmentos de cristas e alguns topos aguçados. Nesse caso, as áreas denudacionais construtivas têm relação com os colúvios depositados na base das vertentes. Além disso, diferentemente do que ocorre próximo aos divisores, as porções intermediárias da bacia (longitudinalmente) apresentam áreas fluviais construtivas proporcionais às destrutivas.

FIGURA 50 - MAPEAMENTO NA REGIÃO DE RONCADOR

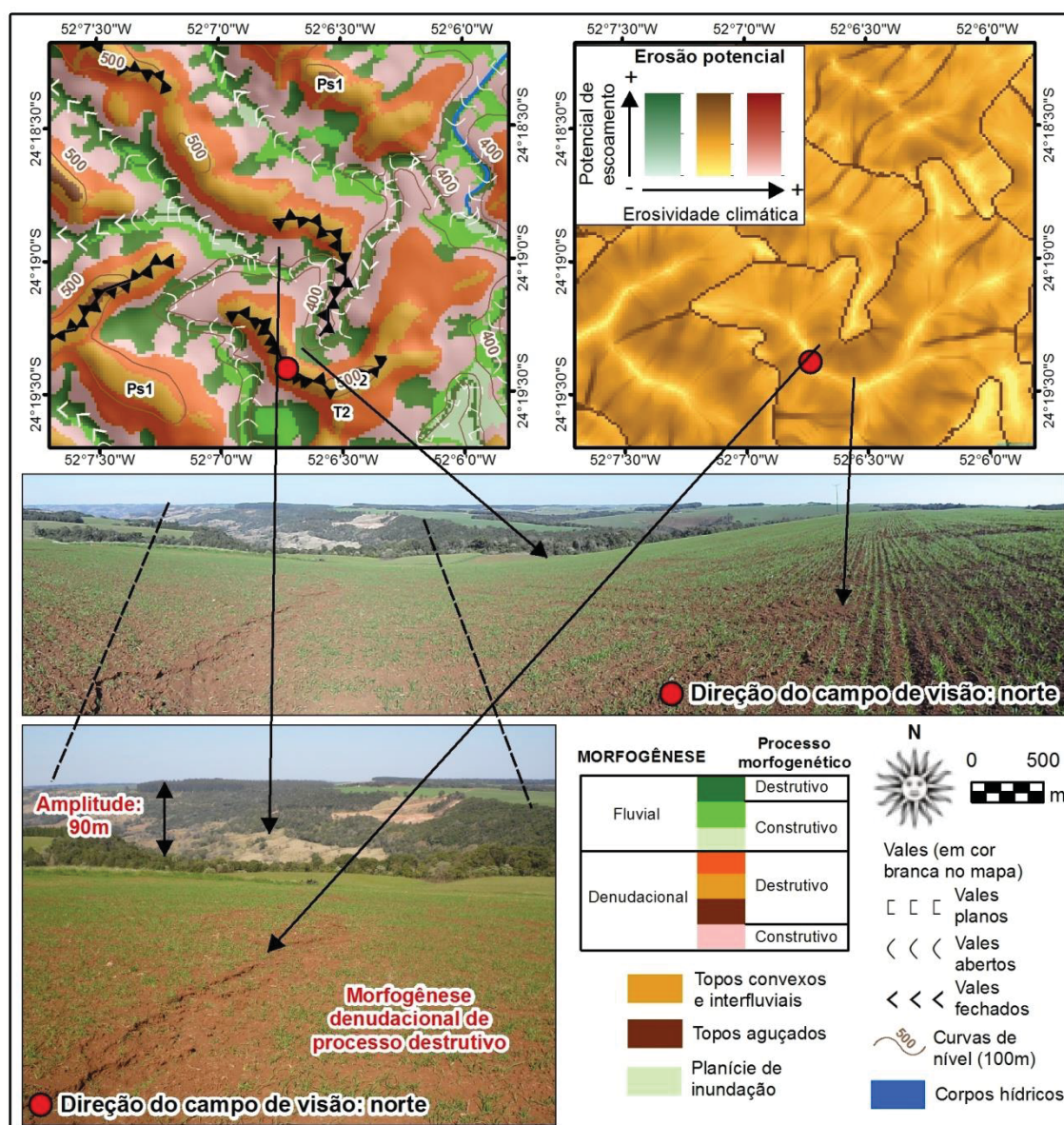


FONTE: o autor (2019)

Outro resultado ilustrado pela FIGURA 51 evidencia, no mesmo recorte, a modelagem da erosão potencial (que, na proposta apresentada, consta como cartograma adicional no *layout* final dos mapas geomorfológicos). As áreas de maior potencial erosivo foram corretamente atribuídas aos canais de drenagem e, num

segundo momento, às vertentes declivosas com formato predominante côncavo-convergente. Na fotografia que demonstra essa porção com alto potencial erosivo, consta um processo inicial de ravinamento, favorecido pelo uso do solo, que o mapa principal classificou como feição morfogênética fluvial destrutiva. O interflúvio, ao lado na fotografia panorâmica, foi modelado com baixo potencial erosivo e como segmento de crista em topo convexo. A erosividade climática, única variável não morfométrica empregada, refinou a interpretação sobre a erosão potencial — nesse caso, com uma erosividade climática mediana.

FIGURA 51 - MAPEAMENTO E EROSÃO POTENCIAL NA REGIÃO DE IRETAMA



FONTE: o autor (2019)

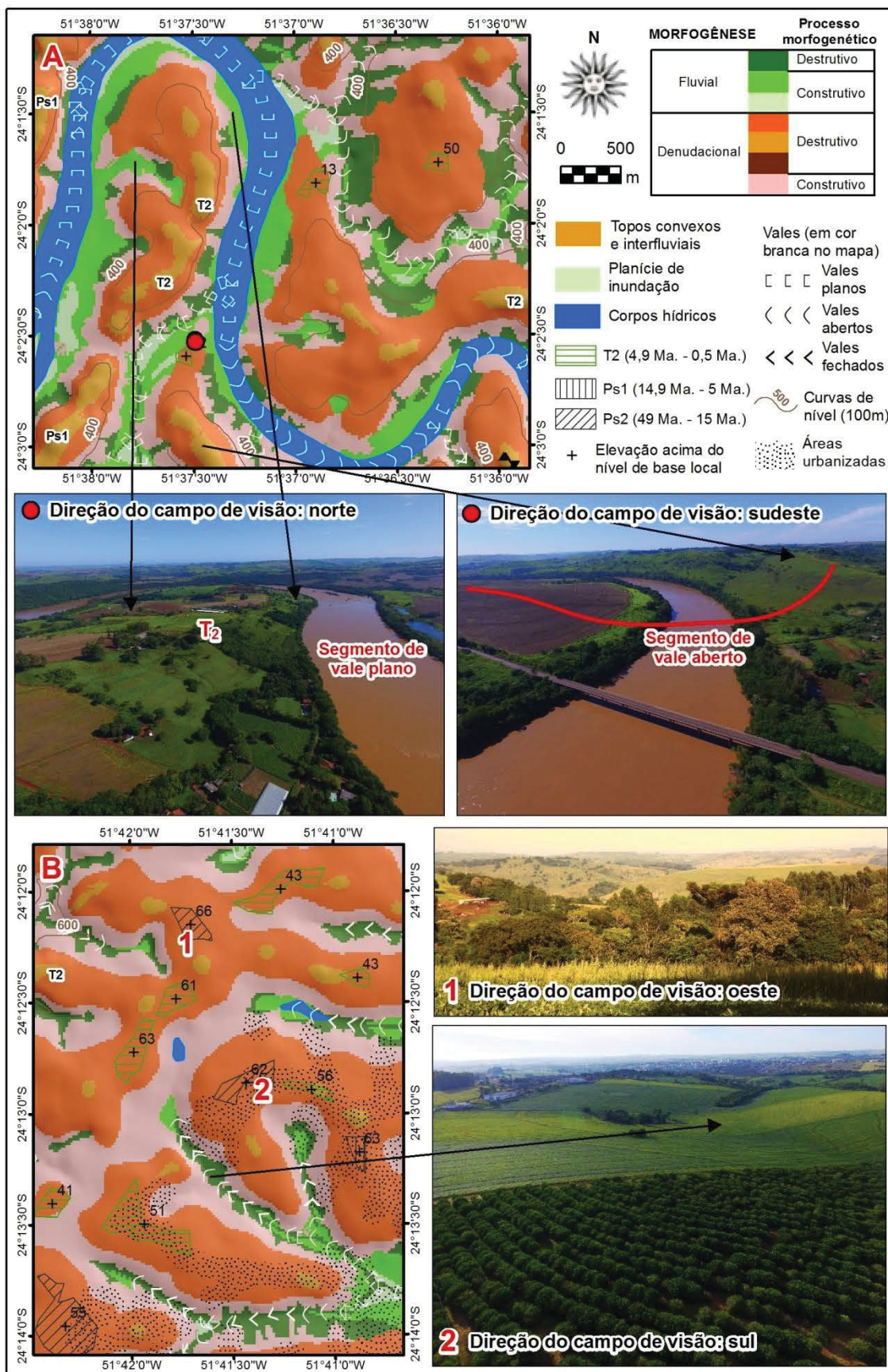
Verificou-se, nessa análise longitudinal da bacia hidrográfica com controle de campo, que quanto mais próximo do rio Ivaí o relevo se apresenta menos dissecado, o que reflete nos objetos mapeados. Como se observa na FIGURA 52A, no município de Borrazópolis, não há presença de cristas ou mesmo de topos convexos contínuos, ainda que as porções denudacionais sejam extensas — possivelmente devido aos vulcanoclastos, que sustentam a Ps_2 modelada em alguns remanescentes planos. Os vales se alternam entre segmentos fechados (onde predomina processo morfogenético destrutivo) e abertos (ora construtivos e ora destrutivos).

Às margens do rio Ivaí, enfim, como exposto pela FIGURA 52B, na região de Borrazópolis, constatou-se o predomínio de morfogênese fluvial construtiva. Observe-se que todas as margens de deposição do rio foram corretamente mapeadas como feições fluviais construtivas. Além disso, a modelagem dos vales foi tão eficiente que conseguiu distinguir a transição exata entre os segmentos de vales planos dos vales abertos, sustentados por pequenas elevações no entorno, como ilustra a fotografia. Entretanto, por ser uma área muito plana, em alguns locais as porções fluviais destrutivas foram superestimadas.

Em suma, reforça-se que as amostras num perfil longitudinal da bacia do rio Ivaí, representadas pela FIGURA 50 (divisores), FIGURA 51 (terço médio), FIGURA 52A (terço inferior) e FIGURA 52B (fundo de vale), ilustram as diferenças do relevo, amparadas por relações de energia em cada porção, e as consequentes feições identificadas pela modelagem. Apesar de algumas especificidades locais, o mesmo padrão foi observado nas demais bacias hidrográficas do Terceiro Planalto.

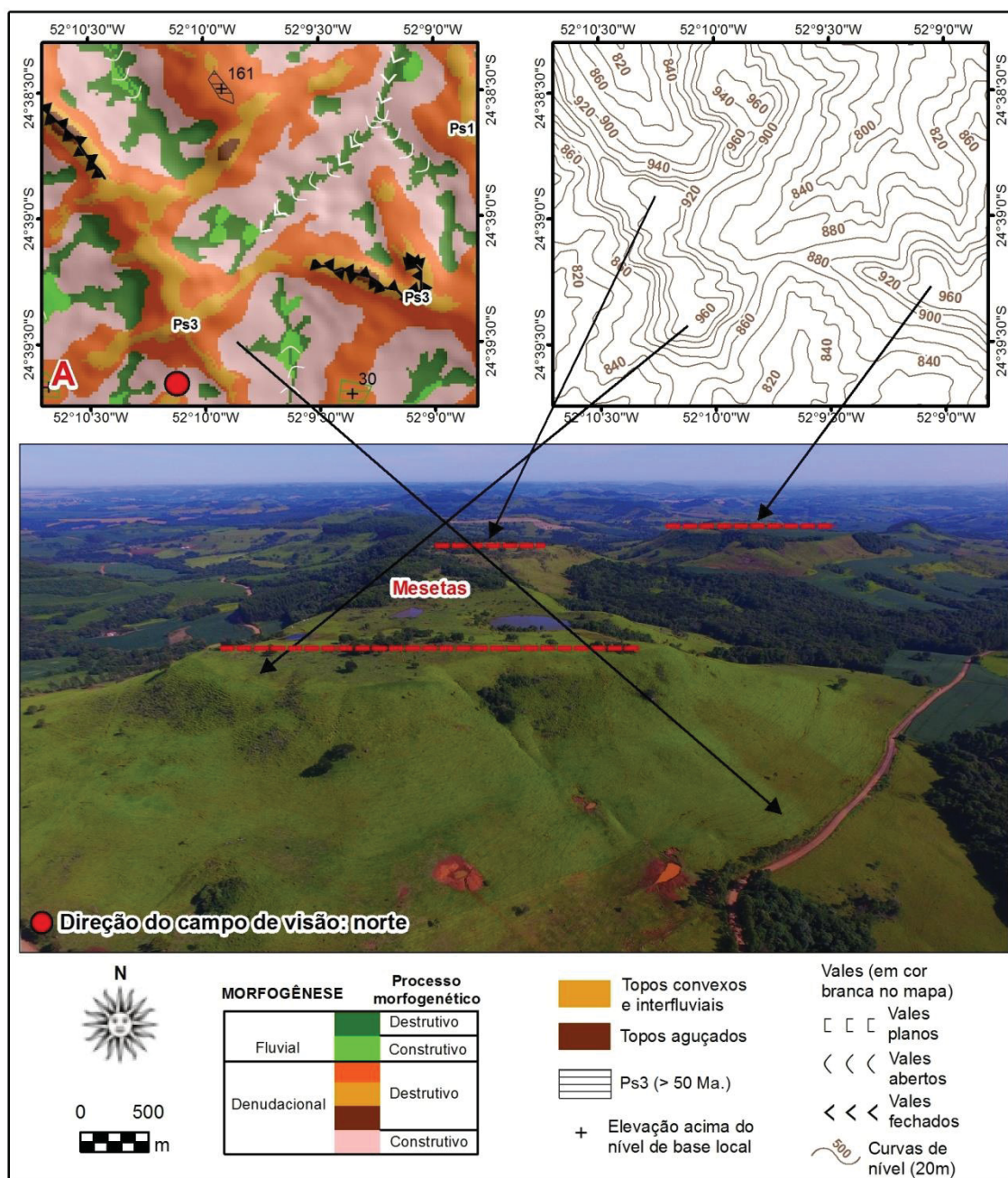
Dentre essas especificidades, há um caso interessante nos divisores da bacia hidrográfica do rio Piquiri. Conforme destacado pela FIGURA 53, cuja localidade está somente a 1700 metros de distância dos divisores da bacia do rio Ivaí, os topos possuem forma predominante tabular, constituindo mesetas. As mesetas são feições comuns do Terceiro Planalto, sobretudo devido às características dos derrames basálticos. Por ser uma posição interfluvial de uma grande área de drenagem, a morfogênese fluvial se apresenta confinada em contraste à morfogênese denudacional prevalecente. Outro aspecto relevante é a modelagem da Ps_3 , a paleosuperfície mais antiga (50 Ma), o que reforça a resistência erosiva dessas feições na paisagem.

FIGURA 52 - MAPEAMENTO NO RIO IVAÍ, REGIÃO DE BORRAZÓPOLIS



FONTE: o autor (2019)

FIGURA 53 - MAPEAMENTO NA REGIÃO DE MATO RICO



FONTE: o autor (2019)

Entretanto, como apontado na FIGURA 53, as mesetas foram mapeadas como “topos convexos e interfluviais”, apesar da sua forma tabular. Destaca-se que inicialmente esses topos foram modelados como remanescentes planos de paleosuperfícies, mas não foram contemplados na representação gráfica devido ao filtro aplicado na classificação (que, por uma questão de escala, as feições inferiores a 10000 m² foram generalizadas). Como as regras de classificação foram unificadas para todo o estado do Paraná, abrir uma exceção para mapear as mesetas

ocasionaria na representação em demasia dos remanescentes de paleosuperfícies e terraços em outros locais da área de estudo que não possuem tal ocorrência.

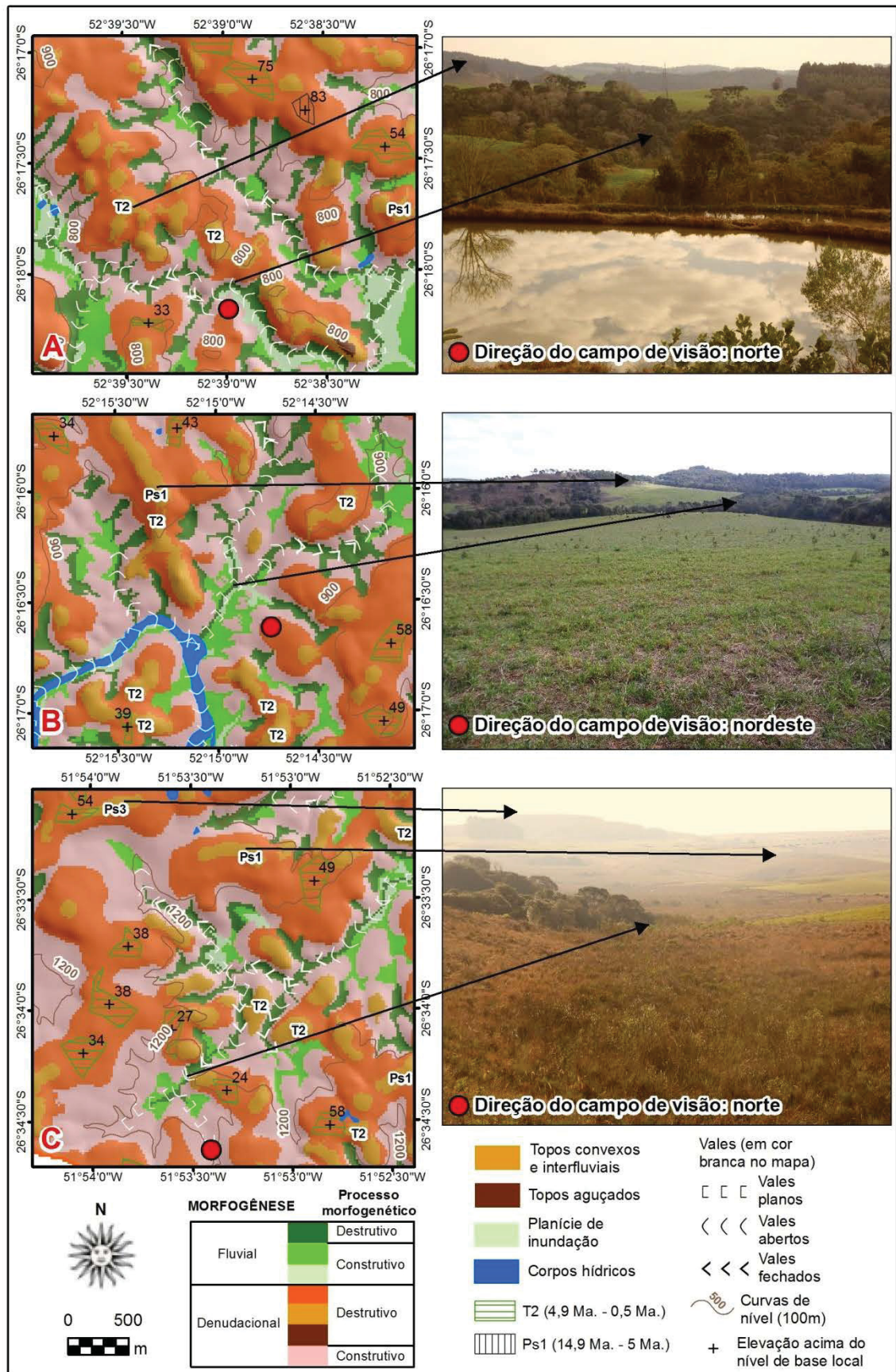
Por esse motivo, as mesetas foram generalizadas considerando a escala final do mapeamento (1:50.000). A representação das curvas de nível permite observar o aspecto plano dos topos mencionados. E conforme a erosão avança lateralmente, os topos resistentes ficam tão estreitos que formam segmentos de cristas. Na área, o predomínio é da morfogênese denudacional construtiva, justificado pelo material depositado nos últimos 50 milhões de anos (Ps_3) ao longo das vertentes.

As porções mais elevadas do Terceiro Planalto, no entanto, localizam-se no sudoeste paranaense, na bacia hidrográfica do rio Iguçu. A FIGURA 54 representa recortes amostrais que abarcam as regiões de Pato Branco (A), Clevelândia (B) e Palmas (C). O relevo é bastante diversificado e a conferência de campo respaldou o mapeamento realizado. Numa tentativa de explicar a conformação geomorfológica regional, Paisani *et al.* (2008) identificaram oito níveis de paleosuperfícies organizadas em escadaria, de leste para oeste, cuja natureza dos derrames exerceu pouca influência na elaboração das superfícies, sendo essas formadas por processos de etchplanação.

Nesse contexto, a região de Palmas (FIGURA 54C) foi definida, no estudo de Paisani *et al.* (2008), com o terceiro nível de superfície aplanada, qualificada como “1º patamar extenso”. No recorte ilustrado, tais características foram evidenciadas pelo mapeamento: preponderância de morfogênese denudacional, feições fluviais restritas, presença de muitos remanescentes planos, topos convexos em relevo colinoso, altimetria elevada (\cong 1200 metros) e altos topográficos atribuídos à Ps_1 (5 Ma), em segundo plano na fotografia, e à Ps_3 (50 Ma), em terceiro plano. Ou seja, todos os objetos são condizentes ao relevo típico próximo à superfície de cimeira com feições residuais.

Seguindo a leste, a região de Clevelândia (FIGURA 54B) encontra-se numa superfície dois degraus abaixo (quinto nível), denominada como “superfície interplanáltica” (PAISANI *et al.*, 2008). Nela, a cota altimétrica decresce para aproximadamente 900 metros, os processos fluviais se tornam proeminentes, com muitos vales abertos, e, numa perspectiva cronológica, as maiores elevações são atribuídas à Ps_1 (5 Ma), com um número reduzido de remanescentes planos se comparado às áreas mais elevadas a oeste.

FIGURA 54 - MAPEAMENTO NA REGIÃO SUDOESTE DO PARANÁ



FONTE: o autor (2019)

Cabe ressaltar, também, os bons resultados da modelagem referente às porções denudacionais construtivas, que incluem as feições coluvionares. Comparativamente à caracterização das rampas de colúvio realizada por Paisani *et al.* (2017) na região de Palmas, com análise pedoestratigráfica e geocronológica, os limites morfogenéticos modelados são fidedignos às quebras de relevo que marcam o predomínio deposicional nas vertentes, resultado de processos do Quaternário. Considerando que “as rampas de colúvio são unidades geomórficas de trânsito de sedimentos entre colinas e fundos de vale de baixa ordem nas superfícies de cimeira” (PAISANI *et al.*, 2017, p. 797), o mapeamento contemplou os referidos aspectos.

Ainda mais a leste, na região de Pato Branco (FIGURA 54B), Paisani *et al.* (2008) atribuíram o sétimo nível de superfície aplanada (dos oito caracterizados) e a definiram como “3º patamar extenso”. Como se pode observar pelo recorte ilustrativo, o relevo (já na cota de 800 metros) é mais dissecado, com muitos vales fechados, significativas planícies de inundação e, ao mesmo tempo, alta densidade de porções morfogenéticas fluviais destrutivas erodindo as vertentes. Referente a esse último aspecto, foram detectados alguns erros do mapeamento, com áreas fluviais destrutivas isoladas (canais de primeira ordem e alguns anfiteatros) que não têm conectividade com o leito principal.

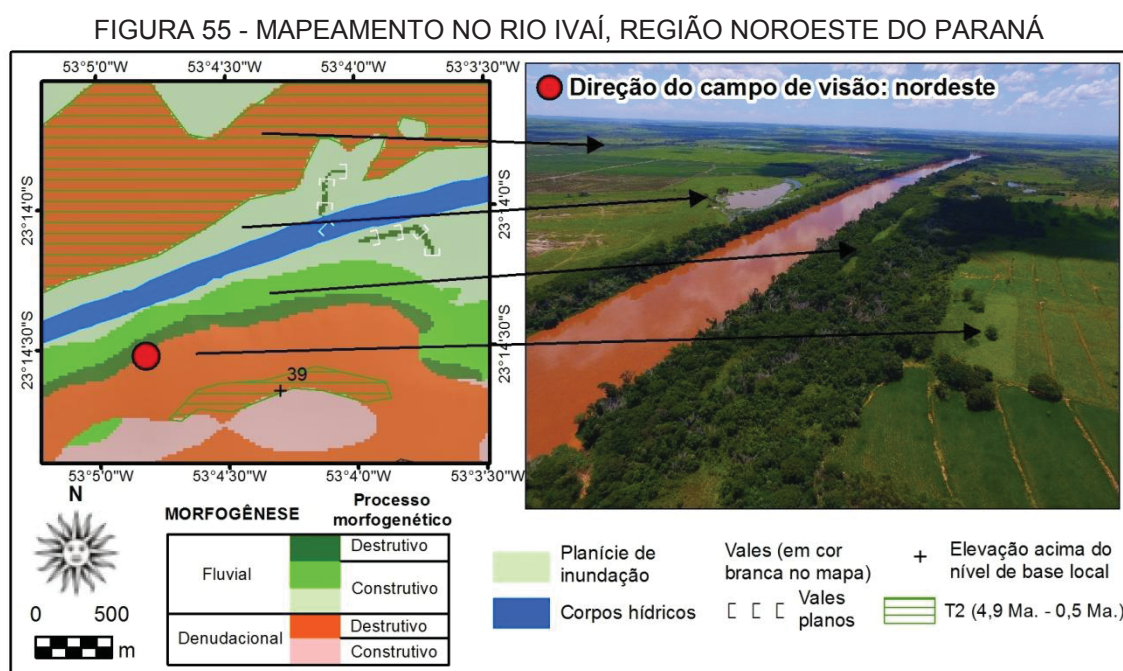
Ao longo da bacia hidrográfica do rio Iguaçu, a confluência com o rio Paraná (na região de Foz do Iguaçu) resulta em cotas altimétricas abaixo de 200 metros, o que denota o gradiente altimétrico de aproximadamente 1000 metros entre o sudoeste e o leste paranaense — tudo no contexto dos derrames basálticos. Em função do nível de base do rio Paraná, a erosão remontante do rio Iguaçu avança gradativamente a oeste, resultando em altas taxas de denudação. Essas características do relevo foram notabilizadas pela modelagem, seja pelas atribuições morfocronológicas, seja pelas feições e processos mapeados.

Já na região noroeste do estado do Paraná, sob influência da cobertura sedimentar da Formação Caiuá, o mapeamento permitiu identificar diferenças do padrão de relevo em relação restante do Terceiro Planalto alocado sobre as rochas ígneas. Os fatores morfométricos mais relevantes se referem à extensão média das vertentes, que é de 1500 metros, e à baixa declividade (6%, enquanto nos derrames basálticos o valor médio é de 10,6%). Como consequência, a densidade de

drenagem é menor e a extensão das unidades morfogenéticas, no mapa resultante, foi maior.

No terço inferior da bacia hidrográfica do rio Ivaí, já próximo à foz com o rio Paraná, foram mapeadas extensas planícies de inundação que chegam a 3 km para cada margem. Mesmo sendo uma área muito plana e, portanto, contendo informações planialtimétricas (que compuseram o MDT utilizado na modelagem) esparsas, houve a correta identificação dos principais objetos geomorfológicos que ocorrem na região — cujo detalhamento superou as expectativas iniciais do trabalho, ainda que alguns erros sejam pronunciados.

Como exemplo, a FIGURA 55 traz um recorte representativo da área mencionada. Destaca-se a exatidão dos limites: i) da planície de inundação, corroborada pelas porções alagadas próximas ao leito, como indica a fotografia; ii) da morfogênese fluvial construtiva, na margem esquerda (a sul), que favorece uma área maior de vegetação ciliar; iii) da morfogênese fluvial destrutiva, também na margem esquerda, com a ruptura de declive vegetada que demarca o leito maior do rio; iv) da morfogênese denudacional destrutiva, na margem esquerda, corroborada pela área utilizada na agricultura, como ilustra a fotografia; v) da morfogênese denudacional destrutiva, na margem direita (a norte), mapeada integralmente como terraço fluvial.



FONTE: o autor (2019)

Entretanto, em alguns locais o relevo é tão plano que a modelagem não foi capaz de distinguir claramente os limites entre as unidades mapeadas, consistindo em erros de inclusão (tal como as porções denudacionais e fluviais construtivas mais a sul na FIGURA 55). Novamente isso se deve ao fato dos parâmetros empregados serem unificados para a classificação realizada em todo o estado do Paraná. No noroeste, o comprimento das vertentes é comumente superior ao raio utilizado para a obtenção do atributo geomorfométrico IPT, que foi de 500 metros, por exemplo. Ou seja, há a possibilidade de refinamento dos resultados. A proposta metodológica apresentada considerou parâmetros que refletem os valores morfométricos médios que melhor se adequam à área de estudo em sua totalidade.

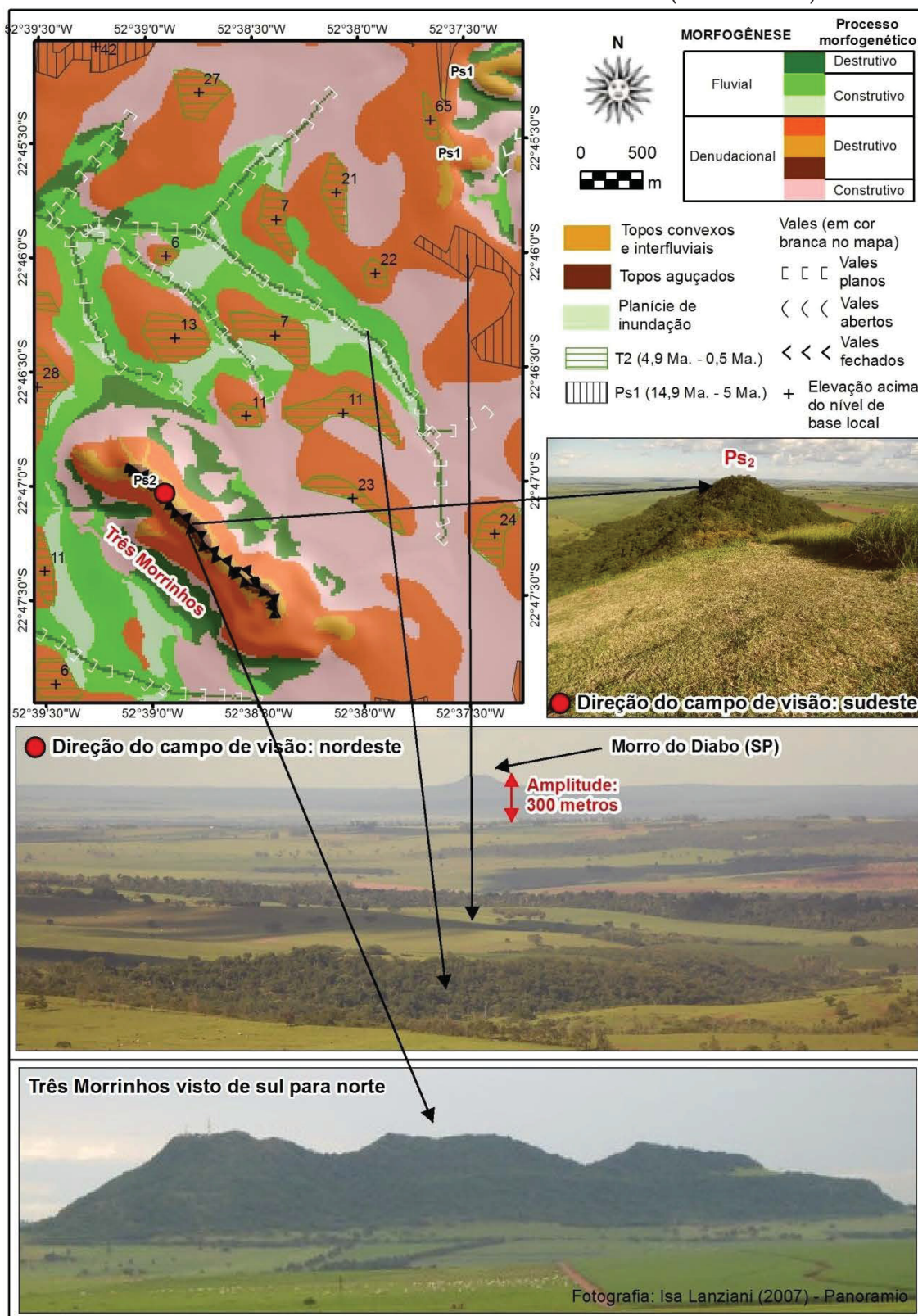
Diferentemente de outras regiões do Paraná, no noroeste prevalece a morfogênese construtiva, sobretudo a fluvial. Em aspectos quantitativos, as porções deposicionais, juntas, contabilizaram 36% da região (sendo 16% fluvial). Devido às características morfométricas da área, alguns objetos não foram mapeados ou tiveram pouca representatividade, tais como: suscetibilidade à corrida de detritos, grandes cones de dejeção, topos aguçados e segmentos de cristas. Outros objetos, tais como as planícies de inundação e os topos planos indicados por terraços ou remanescentes de paleosuperfícies, tiveram ocorrência eminente. Além desses, destacam-se os vales planos, que proporcionalmente representaram 44% do total dos vales mapeados, enquanto os vales abertos tiveram 50% e os vales fechados apenas 6%. O mapeamento ressaltou, assim, as qualidades intrínsecas ao relevo colinoso do noroeste paranaense.

Dentre as paisagens de exceção, o município de Terra Rica conta com feições peculiares derivadas de arenitos silicificados, que resultaram em elevações residuais conhecidas localmente como “Três Morrinhos” (APÊNDICE 8). Segundo Fernandes *et al.* (2012), os altos topográficos foram formados “pela silicificação localizada de depósitos arenosos do antigo Deserto Caiuá, mediante ascensão de fluidos hidrotermais por sistemas de fissuras regionais, relacionada com magmatismo alcalino neocretáceo” (p. 1).

A FIGURA 56 e apresenta os resultados do mapeamento próximo aos Três Morrinhos. Em constraste ao relevo suave ondulado do entorno, com muitos vales planos e terraços (cujas feições fluviais destrutivas são atestadas pela vegetação ripária), cada um dos três topos proeminentes foi corretamente modelado com topo aguçado, intercalados com topos convexos — e o conjunto total foi contemplado por

um segmento de crista com 1,7 km. A morfogênese denudacional construtiva, nos sopés da elevação, é condizente aos processos deposicionais atuantes.

FIGURA 56 - MAPEAMENTO NOS TRÊS MORRINHOS (TERRA RICA)



FONTE: o autor (2019)

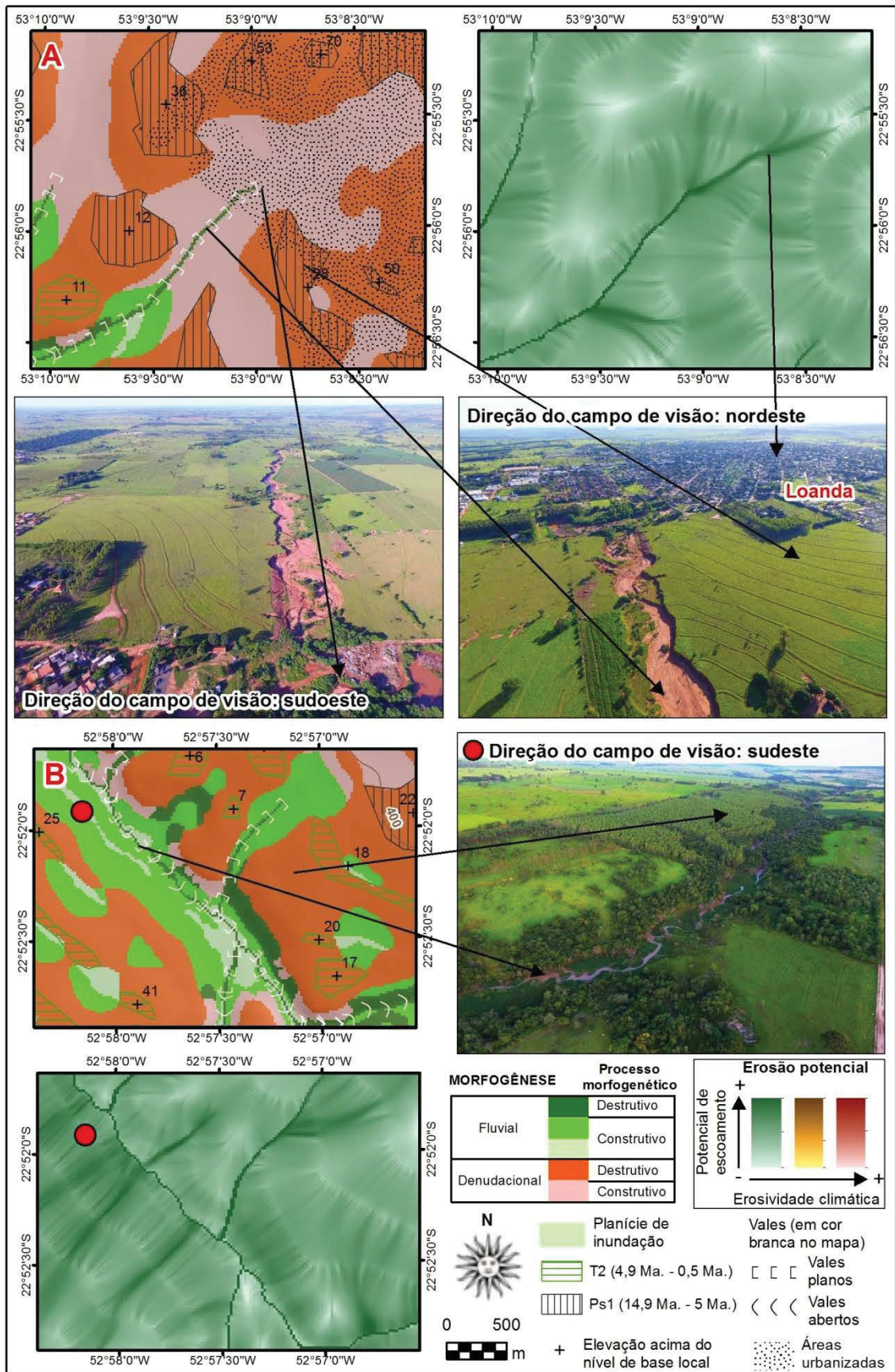
Outro aspecto relevante mapeado (APÊNDICE 8 e FIGURA 56) foi a atribuição da Ps₂ ao cume dos Três Morrinhos, que conforme os critérios da modelagem compreende o intervalo cronológico de 49 Ma até 15 Ma. Esse resultado é corroborado pelo estudo de Fernandes *et al.* (2012), que, ao explicarem a evolução geomorfológica da área, inferiram que os topos correspondem à cota mínima da superfície de aplanamento Sul-Americana, elaborada entre Cretáceo Superior e Paleógeno, correlacionando-a com o Pd₂ dos trabalhos de Bigarella.

O Morro do Diabo (segunda fotografia da FIGURA 56), localizado a 45 km de distância dos Três Morrinhos, já no estado de São Paulo, possui as mesmas características genéticas da feição testemunha no lado paranaense. São, portanto, correlatas. Se os topos tiverem, de fato, a idade de aproximados 40 Ma, é possível deduzir preliminarmente pelos resultados da modelagem que a taxa média de denudação na área é de 6,25 metros por milhão de ano, já que tanto os Três Morrinhos quanto o Morro do Diabo possui amplitude altimétrica em torno de 250 metros (300 até o nível de base local).

Devido à fragilidade do solo derivado do arenito Caiuá, a região noroeste apresenta erosões hídricas lineares extensas (com ravinas e voçorocas ativas) que desde os primórdios da colonização, na década de 1940, configuram um grande problema para a população local. A suscetibilidade natural às feições erosivas pode ter sido potencializada pela própria ocupação, já que (entre outros fatores) 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. Três dos municípios mais populosos da região noroeste (Paranavaí, Umuarama e Cianorte), por exemplo, têm a ocorrência de voçorocas.

No município de Loanda, como exemplificado pela FIGURA 57, constam notáveis voçorocas com quilômetros de extensão. O primeiro caso (A) evidencia uma voçoroca adentrando a área urbana do município, enquanto o segundo exemplo (B) representa uma voçoroca na área rural já conectada ao sistema de drenagem. No recorte da FIGURA 57A, como a cidade está localizada na porção mais elevada regionalmente, a modelagem atribuiu corretamente a morfogênese denudacional com muitos remanescentes da Ps₁. O destaque da modelagem, no entanto, é a própria voçoroca, cujos limites de ocorrência foram mapeados com exatidão pela classe morfogenética fluvial destrutiva e pelos vales planos.

FIGURA 57 - MAPEAMENTO E EROSIÃO POTENCIAL EM LOANDA, REGIÃO NOROESTE



FONTE: o autor (2019)

Note-se, na FIGURA 57A, tanto pela fotografia quanto pelo mapeamento, que a feição erosiva já atinge a área urbana. Como a erosão é remontante, a tendência natural é que ela avance, gradativamente, até o topo da vertente — onde a cidade está localizada. E essa condição foi devidamente assinalada pela modelagem da erosão potencial, 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 na área. Esse é um resultado importante, já que as obras de contenção erosiva são um desafio para o poder público, especialmente essa grande voçoroca de Loanda.

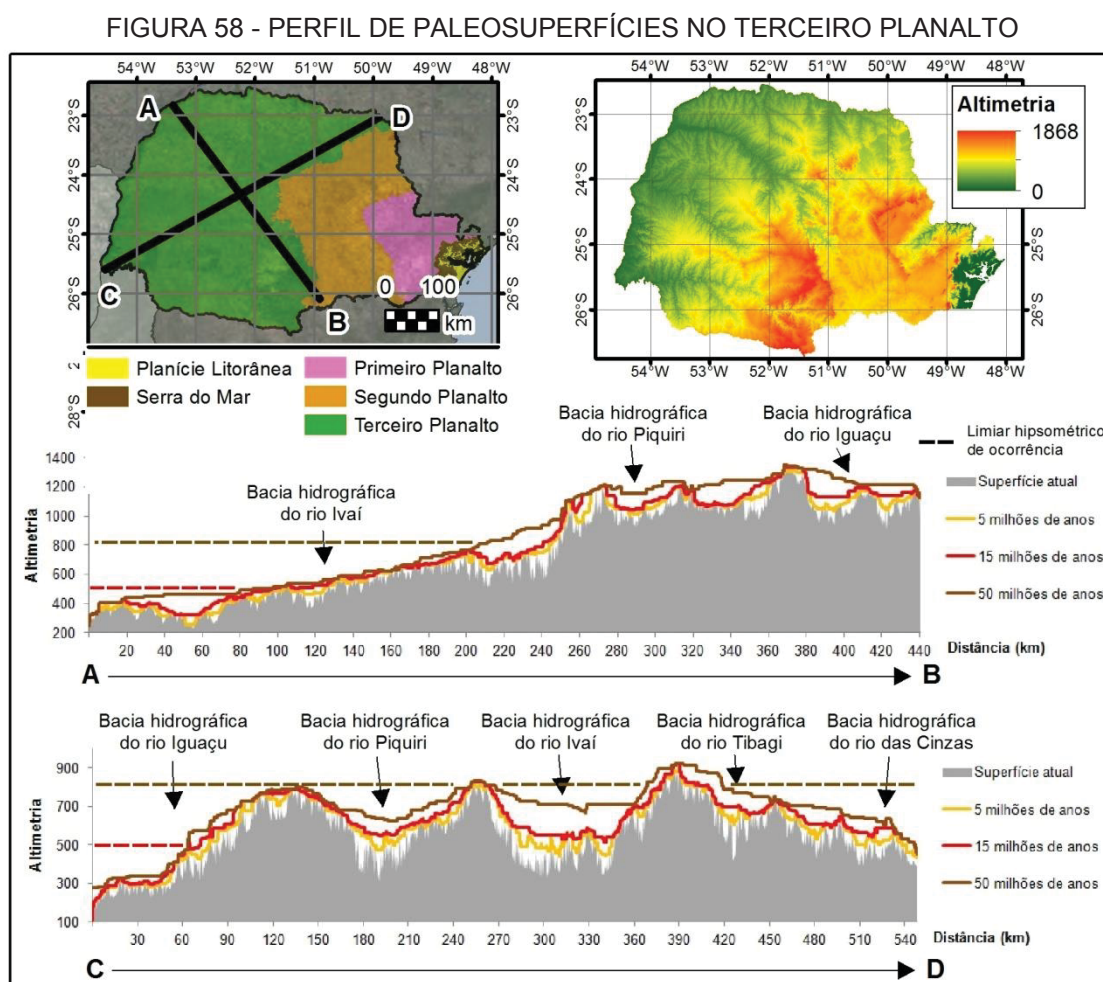
No recorte da FIGURA 57B não há áreas urbanizadas, mas a supressão vegetal pode ter sido o fator que mais influenciou na gênese da feição erosiva destacada. Os objetos foram mapeados adequadamente, com alguns segmentos de vales abertos e muitos terraços. Os limites de algumas planícies de inundação e também de porções fluviais construtivas nos topos, todavia, foram mapeados incorretamente (em função da baixa declividade da área e dos parâmetros relacionados ao comprimento das vertentes, como já discutido). A modelagem da erosão potencial, nesse caso, ressaltou a tendência de formação de canais de primeira ordem associados à voçoroca.

Referente à morfocronologia do Terceiro Planalto, os resultados obtidos foram correlacionados às interpretações e/ou datações de trabalhos prévios que buscaram explicar a reconstituição do relevo na área. Nas análises baseadas em observações qualitativas, destacam-se as publicações de Justus (1985), que adaptou a proposta dos pediplanos de Bigarella *et al.* (1965) no noroeste; de Paisani *et al.* (2008), com os já mencionadas oito níveis de paleosuperfícies dispostas em escadaria na região sudoeste; e de Biffi e Paisani (2018), aprofundando a discussão, que buscaram analisar as superfícies de cimeira no denominado “Planalto das Araucárias”, que no Paraná compreende a porção centro-sul do Terceiro Planalto. Nas análises geocronológicas com datação, destacam-se as publicações de Riffel *et al.* (2016), na região de Guarapuava, e de Couto (2015), na região noroeste, em sub-bacias hidrográficas do rio Ivaí. Em suma, uma ampla revisão sobre as superfícies de aplanamento no Terceiro Planalto foi realizada por Fumiya (2017).

Considerando, inicialmente, as interpretações mais teóricas sobre a evolução do relevo do Terceiro Planalto, os resultados da modelagem

morfocronológica foram coerentes às hipóteses aventadas na literatura. Como demonstrado pelos recortes amostrais até aqui, tanto os terraços quanto os remanescentes de paleosuperfícies são justificados por fatores locais e, de modo concomitante, por fatores regionais.

Os níveis da Ps₃ (50 Ma) mapeados se concentraram na porção centro-sul do Terceiro Planalto, sobretudo nas regiões de Guarapuava e Palmas, além dos principais divisores das grandes bacias hidrográficas (FIGURA 58). Por serem as áreas mais elevadas, passando da cota de 1200 metros, constituem os níveis de cimeira e, no contexto paranaense, podem ser correlacionados a alguns topos da Serra do Mar e ao reverso da escarpa entre Primeiro e Segundo Planalto (nos quais o mapeamento também identificou como Ps₃).



Biffi e Paisani (2018) concluíram que as superfícies de cimeira não são controladas apenas pela litologia, pois elas “transpõem limites laterais dos derrames

básicos, intermediários e ácidos, embora predominem sobre estes últimos” (p. 466) e em muitos casos coincidem com falhas e fraturas, o que indica, também, controle neotectônico.

O relevo em escadaria de algumas porções do Terceiro Planalto, como destacado em exemplos anteriores, também guarda relação com os níveis das paleosuperfícies. Para Paisani *et al.* (2008) e Biffi e Paisani (2018), as superfícies evoluíram pela ação da etchplanação com a remoção de coberturas preexistentes pelas variações climáticas, seguidas de pequenos soerguimentos responsáveis por escarpamentos que conferem degraus no relevo aplanado.

Com o aprofundamento do nível de base ocasionado pelo rio Paraná após o *rift* continental, todo o sistema de drenagem do Terceiro Planalto desde então vem dissecando fortemente o relevo de oeste para leste. Nesse contexto, os níveis da Ps₂ (15 Ma) foram evidenciados, com predominância, nos divisores regionais e nas principais elevações residuais no interior das grandes unidades hidrográficas, que marcam essa fase de intensa erosão remontante. Por esse motivo, quanto mais a leste, maior foi a ocorrência de topos e remanescentes da Ps₂.

Assim como em outras regiões do estado, os níveis da Ps₁ (5 Ma) foram mapeados nos divisores de sub-bacias hidrográficas, nos quais os terraços (com idades inferiores a 5 Ma) constam nas margens dos sistemas fluviais. No Terceiro Planalto, verificou-se que a ocorrência da Ps₁ aumentou conforme a proximidade à foz dos grandes rios, como Iguaçu, Piquiri e Ivaí. Na região noroeste, que concentrou a maior densidade de registros da Ps₁, Justus (1985) mapeou a área como “Superfície Interplanáltica”, relacionando-a ao Pd₁ de Bigarella *et al.* (1965), com idade Pleistocênica. A interpretação, portanto, condiz com os resultados da modelagem (como o exemplo no município de Loanda, ilustrado pela FIGURA 57)

Destaca-se, contudo, que diferentemente das outras unidades morfoesculturais do Paraná, cuja heterogeneidade litológica confere resistências erosivas distintas, no Terceiro Planalto a relativa homogeneidade do basalto (mesmo considerando as associações entre derrames e vulcanoclastos) faz com que, comumente, não restem feições testemunhas na paisagem. Como consequência, a metodologia aplicada pode ser falha em locais que o processo de denudação é generalizado e não preserva topos residuais (utilizados como referência para a estimativa). Por esse motivo, o acréscimo do limiar hipsométrico para a ocorrência

das paleosuperfícies (800 metros para a Ps₃, 500 metros para a Ps₂ e 300 metros para a Ps₁) foi imprescindível para assegurar resultados satisfatórios.

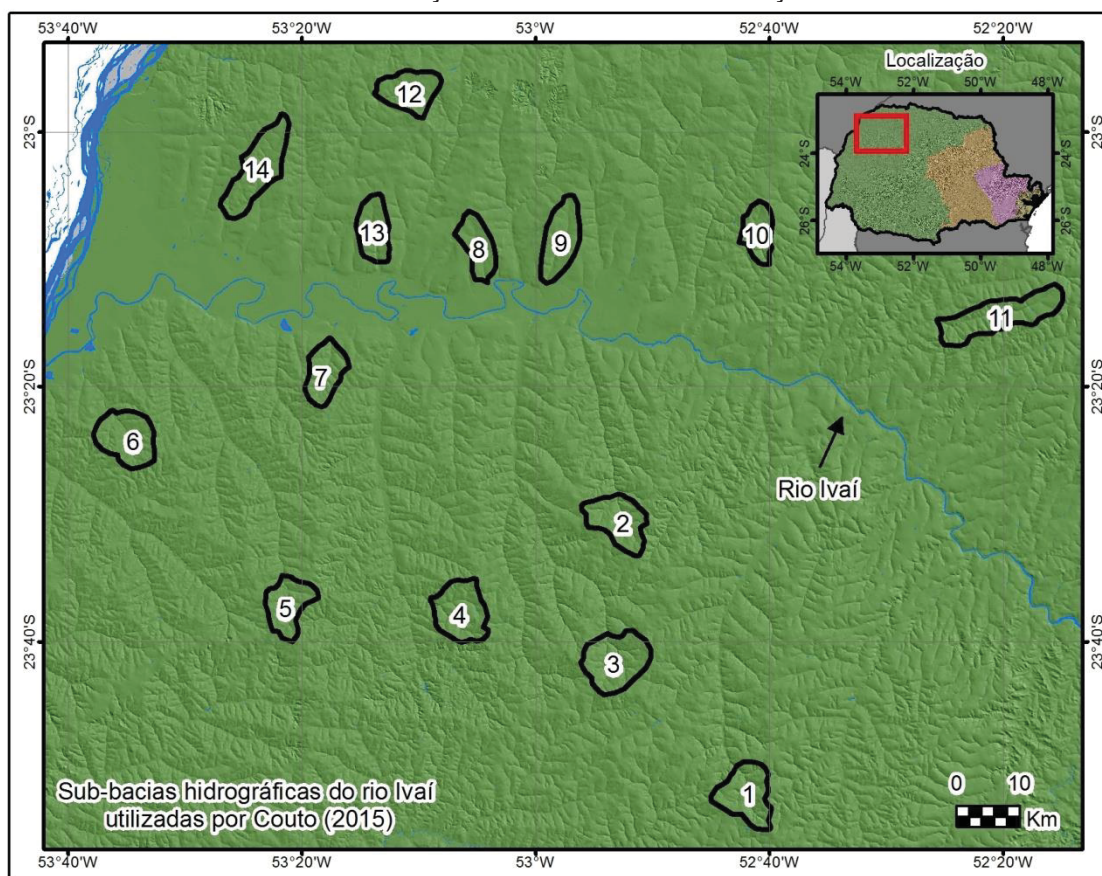
Os dois perfis apresentados pela FIGURA 58 permitem estabelecer um panorama das características mencionadas das paleosuperfícies e também reforçar a importância dos limiares hipsométricos de ocorrência. Não fosse esse critério, maior parte das áreas próximas às margens do rio Paraná seria modelada com idade de 50 Ma, embora na realidade sejam feições recentes, notadamente terraços, com, no máximo, 5 Ma.

A comparação com as datações geocronológicas, no entanto, permitiu avaliar os resultados da modelagem de modo mais factual e preciso. Couto (2015), a partir de núclídeos cosmogênicos ¹⁰Be coletados em sedimentos aluviais de 14 sub-bacias hidrográficas do rio Ivaí (7 em cada margem, conforme espacialização da FIGURA 59), mensurou as taxas de denudação na região noroeste. O mencionado estudo resultou no valor médio de $12,05 \pm 2,98$ metros por milhão de ano na margem esquerda e $7,09 \pm 1,33$ na margem direita, cuja diferença se explica, segundo o autor, pelo soerguimento da margem esquerda durante o Quaternário que ocasionou o reajuste fluvial dos níveis de base regionais (rio Paraná e rio Ivaí).

Ao subtrair os modelos das paleosuperfícies pelo MDT com a superfície atual, dividindo os resultados pelas idades de cada uma delas (50, 15 e 5 milhões de anos), a TABELA 21 apresenta os valores obtidos pela modelagem e uma comparação com as datações de Couto (2015) para cada sub-bacia contemplada (especializadas na FIGURA 59). Como a região noroeste não possui remanescentes da Ps₃, as taxas de denudação ficaram muito diferentes das estimativas mensuradas. O fato de não haver topos residuais referentes a esse paleorrelevo justifica os baixos valores, que em todos os casos não passou de 3,84 m/Ma.

Os resultados da Ps₂ e principalmente da Ps₁, por indicarem um recorte têmporo-espacial menor, se aproximaram mais da datação de referência. Na margem esquerda, considerando a denudação nos últimos 5 milhões de anos, a modelagem indicou o valor médio de 4,5 m/Ma e máximo de 17,7, cujo valor de referência (12,05 m/Ma) se encontra inserido nesse intervalo. O mesmo ocorreu na margem direita, na qual o valor médio derivado do modelo foi 3,36 m/Ma, o máximo foi 14,04 m/Ma e a datação de Couto (2015) apontou 7,09 m/Ma. Destaca-se que a modelagem também identificou a tendência da margem esquerda do rio Ivaí ter passado por maior processo de dissecação do relevo.

FIGURA 59 - SUB-BACIAS HIDROGRÁFICAS UTILIZADAS POR COUTO (2015) PARA A MENSURAÇÃO DA TAXA DE DENUDAÇÃO



FONTE: o autor (2019)

TABELA 21 - ESTIMATIVAS DE TAXAS DE DENUDAÇÃO NO TERCEIRO PLANALTO

Recortes	Couto (2015) (m/Ma)	Estimativa de taxa de denudação						
		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)	
Sub-bacias hidrográficas da margem esquerda do rio Ivaí	1	17,94 ± 0,79	1,2	3,3	3,2	9,7	5,3	22
	2	13 ± 0,44	1,5	3,8	3,5	11,2	4,6	20
	3	12,82 ± 0,56	1,2	3,2	3,8	10	4,6	20,7
	4	11,15 ± 0,35	1,4	3,2	2,8	8,1	4,5	15,5
	5	10,64 ± 0,33	1	2,8	3,1	9	4,3	17,1
	6	9,92 ± 0,32	0,8	2	2,6	7	4,1	14,9
	7	8,88 ± 0,34	2	3,7	2,5	6,9	3,9	13,8
Média	12,05 ± 2,98	1,3	3,1	3,1	8,8	4,5	17,7	
Sub-bacias hidrográficas da margem direita do rio Ivaí	8	8,41 ± 0,28	2,7	4,5	1,9	5,7	2,7	13,2
	9	8,07 ± 0,26	2,5	4,2	1,6	5,3	3,2	13,7
	10	7,99 ± 0,25	2,4	4,4	2,3	7,9	3,5	15,2
	11	7,94 ± 0,27	1,8	4,1	2,8	8,5	5	16,7
	12	6,48 ± 0,21	1	2,6	2,8	7,1	2,5	12,8
	13	6,38 ± 0,23	2,3	4	1,8	5,7	3,3	14,2
	14	4,37 ± 0,16	1,5	3,1	2	6,3	3,3	12,5
Média	7,09 ± 1,33	2,03	3,84	2,17	6,64	3,36	14,04	

FONTE: o autor (2019)

A partir dessas considerações, destaca-se uma importante característica do método proposto: se há a presença de pronunciados topos residuais, deve-se considerar as paleosuperfícies mais antigas (com maior janela móvel para cálculo do BTH) para a estimativa da taxa de denudação; se não há a presença de elevações residuais significativas, normalmente justificadas pela homogeneidade litológica, deve-se considerar as paleosuperfícies mais recentes (com menor janela móvel para cálculo do BTH) para essa mesma estimativa de denudação em metros por milhão de ano.

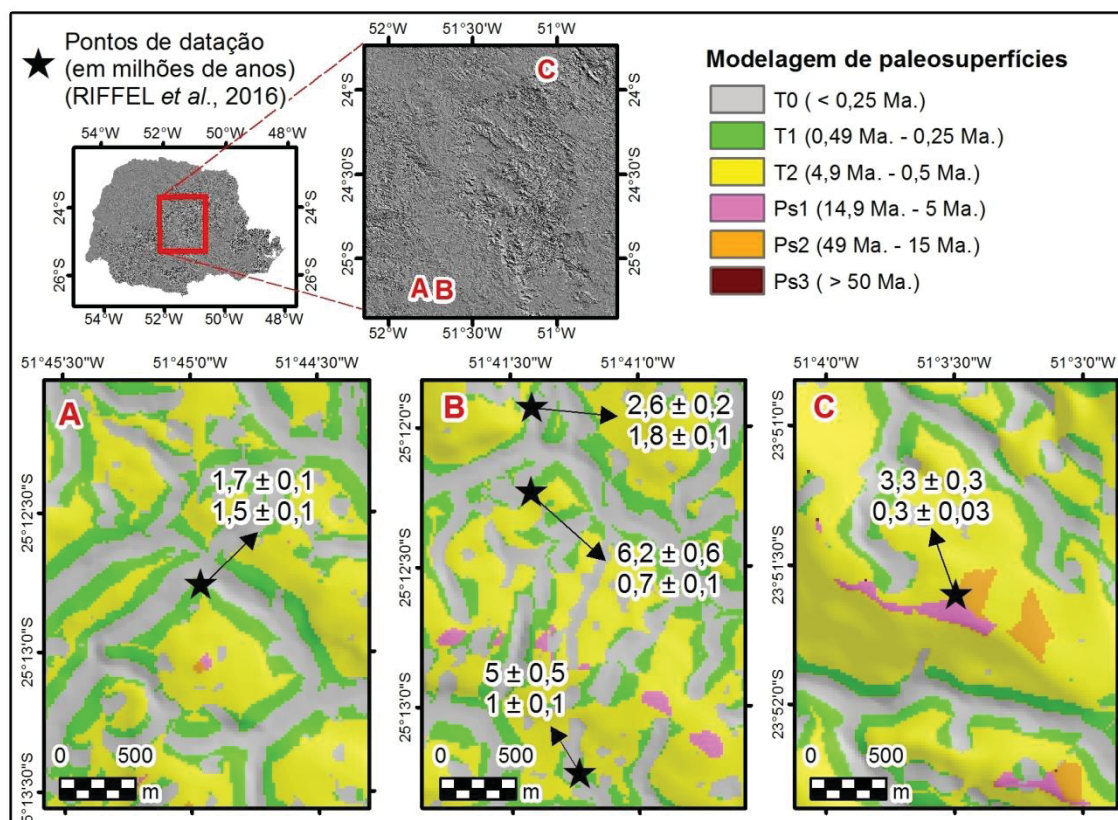
Além disso, a eficácia do método está condicionada ao recorte têmporo-espacial adequado para as interpretações posteriores. Como a região noroeste tem sua morfogênese associada, sobretudo, a eventos ocorridos durante o Quaternário, com poucos registros de feições testemunhas anteriores, a análise deve ser feita considerando o período mais recente. Diferentemente, por exemplo, da Serra do Mar, que possui remanescentes preservados na paisagem do Cretáceo Superior. Isso explica o porquê da Ps₁, na região noroeste do Paraná, indicar os melhores resultados comparativamente às datações de Couto (2015), enquanto na região serrana (capítulo 4.2.2) a Ps₃ foi a que mais se aproximou das datações de Salgado *et al.* (2014).

A datação realizada por Riffel *et al.* (2016) pelo método (U–Th)/He, na região de Guarapuava, indicou que o relevo da área teve conformação recente, com idades que variaram de $6,2 \pm 0,6$ a $0,7 \pm 0,1$ milhões de anos. Os autores justificaram os valores em função da evolução policíclica da paisagem. Dos cinco pontos analisados, conforme a FIGURA 60, todos se localizaram sobre o nível do T₂ (4,9 - 0,5 Ma) — e já no contato imediato com outros níveis de paleosuperfícies, o que demanda atenção por parte do método. Com exceção do ponto central do recorte da FIGURA 60B, com idade datada em $6,2 \pm 0,6$, que foi modelado incorretamente, os demais compreenderam (no limiar) o intervalo da classe da paleosuperfície.

Por fim, como síntese de algumas das características apresentadas do Terceiro Planalto, o APÊNDICE 7 contém o mapa geomorfológico da Carta Borrazópolis. Além dos aspectos discutidos ao longo do capítulo, devidamente representados, destaca-se a presença de diques de diabásio que, mesmo no contexto dos derrames basálticos da Formação Serra Geral, conferem feições alongadas (com topos aguçados e segmentos de cristas) na direção NW-SE. Eis

uma peculiaridade indicada que denota a influência dos diques em todas as unidades morfoesculturais do Paraná.

FIGURA 60 - MODELAGEM DE PALEOSUPERFÍCIES E PONTOS DE DATAÇÃO GEOCRONOLÓGICA NO TERCEIRO PLANALTO



FONTE: o autor (2019)

4.3 LIMITAÇÕES E POTENCIALIDADES DA MODELAGEM

Os principais erros e acertos da modelagem foram destacados, pontualmente, no decorrer da apresentação dos resultados em cada unidade morfoescultural do estado do Paraná — com ênfase na representatividade dos objetos na paisagem, pelo controle de campo, e na comparação com interpretações encontradas na literatura. Ademais, como fechamento do trabalho, apresenta-se uma análise focada nos parâmetros empregados para a modelagem de cada objeto geomorfológico.

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 fluvio-marinha teve o critério mais

simples para a delimitação, fixando-se à cota altimétrica de 20 metros. Os processos morfogenéticos, por sua vez, foram distinguidos pelo IPT com raio intermediário (de 500 metros), nos quais os valores positivos indicaram as porções destrutivas (mais altas que o entorno) e os valores negativos as porções construtivas (mais baixas que o entorno). 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 MDT 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 fluviomarinhos podem ser, em muitos casos, uma representação aproximada. Como o mapeamento adotou uma perspectiva *booleana*, deve-se considerar, na interpretação, a tenuidade entre as classes. De modo geral, todavia, a modelagem foi exitosa, superando as expectativas prévias. Fosse empregado outro Modelo Digital de Elevação, tal como o SRTM, que contempla os objetos na superfície (vegetação, por exemplo), possivelmente os resultados não teriam tanta correlação com as observações de campo na Planície Litorânea.

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 estado do Paraná e refinar os limites das classes mapeadas. A área de contribuição mapeou os talvegues, compondo a rede de drenagem propriamente dita. O IPT, vinculado ao ITU, foi responsável pelos limites externos da morfogênese fluvial. Note-se que para esse atributo foram utilizados três raios: 100, 500 e 5000 metros. Na Serra do Mar, bastante dissecada, o IPT detalhado (raio de 100 metros) foi suficiente, por exemplo. Na bacia sedimentar de Curitiba, entretanto, com baixa declividade e áreas fluviais extensas, foi necessário considerar um IPT generalizado (nesse caso, raio de 5000 metros). Reforça-se, assim, a importância do fator de escala nos atributos geomorfométricos de cálculo regional.

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 1 km² (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 discontinuidades foram modeladas com morfogênese denudacional construtiva. Erros pontuais, considerando a totalidade mapeada.

A última classe morfogenética modelada foi a denudacional, abrangendo todas as áreas que não têm origem fluvial ou fluviomarinha (ou seja, com todos os parâmetros inversos). Para esse objeto, a distinção entre processos construtivos e destrutivos foi parametrizada, unicamente, pelo IPT com raio intermediário (500 metros). As observações em campo, em todo o estado do Paraná, destacaram a representatividade dos processos morfogenéticos (como salientado no decorrer da tese). 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.

Essa característica suscita um ponto importante de discussão da presente tese que, com exceção do cartograma de erosão potencial, foi concebida integralmente pela lógica *booleana* (verdadeiro ou falso, com delimitações rígidas das classes modeladas). Tais como os processos denudacionais construtivos e destrutivos, muitos objetos geomorfológicos têm limites flexíveis e ocorrência caótica na paisagem. Eis um desafio para trabalhos posteriores: incluir regras de classificação amparadas pela lógica *fuzzy* (difusa), com graus de pertinência e que contemplem os níveis de incerteza em porções transitórias. Os próprios valores do IPT permitiriam tal classificação, mas a transcrição gráfica num mapa temático (estático) repleto de informações como o geomorfológico poderia prejudicar a comunicação cartográfica. A questão temática, portanto, é tão importante quanto as questões geomorfométricas. Assim, enfatiza-se que o mapeamento realizado representou uma abstração sobre o predomínio de determinado processo morfogenético.

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 (100 metros), 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. Por conseguinte, na divisão entre os topos convexos e interfluviais e os topos aguçados não foi considerada a morfologia na linha de crista, especificamente, mas sim a diferença de elevação do entorno. Isso pode ocasionar erros, tal como demonstrado em algumas mesetas do Terceiro Planalto. Uma possibilidade para o aprimoramento da caracterização dos topos é a inclusão de atributos geomorfométricos de cálculo local, como a declividade e as curvaturas, sobrepostas ao WTH, que possui cálculo regional.

As planícies de inundação foram concebidas como feições planas (declividade inferior a 3%) em áreas de morfogênese fluvial, cujo parâmetro se mostrou representativo em todo o estado do Paraná. A modelagem buscou representar os limites máximos de ocorrência de inundações no leito maior e, portanto, para esse objeto a lógica *fuzzy* também teria grande potencial de aplicação. Com base nos registros de inundações episódicas ocorridas em rios de distintos contextos geomorfológicos do estado, os limites modelados foram fidedignos. Como ponto negativo consta os erros de alguns polígonos pequenos, distantes do rio principal, que, na realidade, podem ser terraços.

Para as planícies de inundação fluvio-marinhas, o parâmetro definido para o atributo BTH requer atenção — pensando, sobretudo, na replicação da proposta. O valor de $BTH > 2$, na classificação orientada a objeto, foi determinístico e pode não ser adequado considerando três variações possíveis: i) tamanho da célula e características de aquisição do MDT; ii) raio de análise de vizinhança para cálculo do BTH; iii) configuração geomorfológica da área de estudo. No presente estudo, esse parâmetro permitiu indicar os leitos maiores dos rios que têm influência, também, do regime de marés. Para essa classe, ressalta-se que comumente os limites foram superestimados.

Ainda na Planície Litorânea, a modelagem dos terraços fluvio-marinhos só foi possível, novamente, devido ao processo de interpolação que considerou a drenagem como dado linear de entrada. O efeito escavado do MDT conferiu sutis

rupturas de declive detectadas pelo perfil de curvatura. Os valores resultantes desse atributo também variam conforme a resolução do MDT, daí a importância de calibrar a discretização pela interpretação visual. Na perspectiva morfológica, os terraços fluviomarinhos apresentaram correlação com os cordões litorâneos que indicam antigas linhas de costa, o que torna essa classe mais abrangente do que a própria denominação sugere. Se fosse utilizado um valor menor para a extensão mínima dos segmentos convexos, muitas outras feições seriam mapeadas. Entretanto, isso aumentaria enormemente os erros. Devido à pequena variação altimétrica na área e devido à dificuldade de verificação desses objetos (seja em campo ou remotamente), optou-se, precavidamente, por uma representação somente com os terraços mais significativos.

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 1 km 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, atributo inverso), a morfologia foi considerada com análise regional e não local. Hipotetizou-se que quanto maior a variação altimétrica entre o talvegue e o entorno próximo (nesse caso, 100 metros para cada margem), mais encaixado é o vale. Os resultados evidenciaram, majoritariamente, que a proposta foi eficaz na representação das feições conforme o controle de campo. Saliencia-se que os valores próximos às quebras das classes discretizadas pelo desvio padrão do WTH, que distinguiram vales planos, abertos ou fechados, podem resultar em segmentos mapeados erroneamente (problemática das áreas de transição).

Considera-se, também, que é possível a ocorrência de vales abertos (com formato mais próximo a um “U”, côncavo) em áreas que possuam alto valor de BTH, assim como a existência de vales fechados (em “V”, convexo) em porções que possuam baixo valor de BTH. Ainda que sejam incomuns, a ocorrência dessas

feições, no presente mapeamento, caracteriza-se como uma limitação da proposta apresentada. O refinamento do método poderia incluir, adicionalmente, atributos geomorfométricos de cálculo local ou o cálculo de um BTH com raio menor (embora, nesse caso, o detalhamento precise ser compatível com a escala predefinida para o mapeamento).

Os cones de dejeção, por sua vez, foram modelados a partir de uma proposição metodológica cuja concepção reflete, de modo didático, o raciocínio envolvido numa classificação orientada a objeto no âmbito da geomorfometria específica. Por ser uma aplicação sem precedentes, destaca-se que os parâmetros utilizados podem ser ajustados, uma vez que a conferência de campo contemplou poucas dessas feições. Mas, de modo geral, seja pelos cones de dejeção reconhecidos, seja pela interpretação visual a partir das curvas de nível e imagens de satélite, o método obteve êxito na identificação desse objeto morfográfico. 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.

Foram detectadas duas limitações principais. A primeira condiz à atribuição dos cones somente nos pontos de confluência hídrica, pois isso pode excluir os cones formados por rios que, ao desaguardarem numa porção mais plana, com quebra de declive, não tenham afluentes. A segunda (que está vinculada à primeira) se refere à questão locacional, pois como os cones são mapeados automaticamente nas interseções, muitos pontos estão distantes dos sopés das vertentes — onde os cones de dejeção, de fato, estão localizados.

A mesma lógica de classificação foi aplicada para mapear a suscetibilidade à corrida de detritos, que já se define como um objeto morfodinâmico. Novamente utilizando a 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 grosseiros 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, local com predomínio desse processo, os eventos recentes ocorridos comprovam a eficiência do método, inclusive em relação à classificação dos níveis (de moderado a muito alto). Todavia, a ausência de parâmetros que indiquem as características das eventuais áreas fontes dos detritos desponta como uma limitação da proposta. Na região serrana, controlada pelas intrusões graníticas, os deslizamentos translacionais (nos terços superiores das vertentes) e rotacionais (terços médios) conferem disponibilidade de material a ser transportado pelos vales. Os topos, portanto, são declivosos. Mas isso não ocorre homoganeamente em todo o estado do Paraná. A interpretação, assim, é dependente do contexto regional e pode ser auxiliada pelos demais objetos que constam no mapa geomorfológico.

A própria erosão potencial (representada, de modo complementar, como cartograma nos mapas geomorfológicos produzidos) é uma informação morfodinâmica que possibilita essa visualização do contexto mais abrangente. Na modelagem, utilizou-se o atributo geomorfométrico secundário denominado como índice de potência do escoamento (IPE) associado à indicação de três níveis de erosividade climática, definidas, nesse caso, por atributos climáticos. A vinculação entre uma variável morfométrica com uma não morfométrica evidenciou a possibilidade de inclusão de parâmetros afins nos modelos, tornando-os mais complexos, por um lado, e mais fidedignos, por outro.

Quanto à modelagem da morfocronologia, certamente esse é o aspecto que suscitou as maiores dúvidas e incertezas da tese. Contudo, considerando a histórica complexidade e dificuldade de atribuir idade ao relevo, com frutíferos e intensos debates desde o final do século XIX, foi também o aspecto que obteve os resultados mais eloquentes e originais. O método apresentado configura um primeiro ensaio e ainda pode ser melhorado a partir da adaptação dos parâmetros. A aplicação da proposta em outras áreas, que tenham estudos de mensuração morfocronológica para se efetuar um comparativo, também podem auxiliar no refinamento do método.

O atributo BTH foi aplicado sob perspectiva semelhante à dos mapas de *seppômen*, que se utilizam dos níveis de cimeira para a definição de paleosuperfícies. No entanto, a concepção de vincular o tamanho das janelas móveis com a taxonomia têmporo-espacial de Tricart (1965), para então estimar as idades, foi o diferencial da proposta. Embora seja uma regra da Geomorfologia, de que quanto maior uma feição, mais tempo ela demora para ser formada, essa é uma ideia imprecisa e sobretudo teórica. Tentou-se, com base na taxonomia do relevo,

correlacionar os parâmetros temporais com os parâmetros espaciais e, na sequência, comparar os resultados com as interpretações e datações prévias sobre a evolução do relevo paranaense.

De modo geral, 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 o estado do Paraná — principalmente no leste. 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, em outros estados, podem ter os valores muito diferentes).

Sobretudo nas comparações com os trabalhos de estimativa das taxas de denudação — Salgado *et al.* (2014), na Serra do Mar, e Couto (2015), no noroeste —, verificou-se que há uma tendência equivalente (proporcional) dos resultados da modelagem em todas as bacias hidrográficas analisadas. Isso significa que o ajuste nos parâmetros (tamanho da janela móvel) poderia deixar os resultados da modelagem ainda mais próximos daqueles datados por métodos geocronológicos (nuclídeos cosmogênicos ^{10}Be).

O mapeamento das feições planas (terraços e remanescentes de paleosuperfícies) foi realizado com base em dois atributos, numa combinação simples de variáveis: porções elevadas (alto valor de IPT) e com baixa declividade, posteriormente atribuídas a um nível de paleosuperfície (sobreposição com os BTHs calculados). Devido à escala do mapeamento, algumas feições planas mapeadas como terraços talvez não sejam feições fluviais propriamente ditas. E no mapa, cada topo convexo ou aguçado também recebeu a indicação de idade, apresentada textualmente.

Por fim, destaca-se que os objetos morfométricos modelados e explicitados no mapa tiveram função auxiliar (como o relevo sombreado e os cartogramas da hipsometria, declividade e ITU), já que todos os demais objetos foram mapeados com base em parâmetros morfométricos — cada qual com sua assinatura. Os pontos com a indicação da elevação acima do nível de base local, por exemplo, complementam a indicação das cotas altimétricas e permitem situar cada topo no contexto mais abrangente e relacional.

5 CONCLUSÕES

A tese 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 primeira etapa, que consistiu na análise de distintos mapas geomorfológicos a nível mundial, evidenciou que há uma variedade de propostas (conforme o local e conforme a escala) e que, por esse motivo, a padronização almejada desde a década de 1950 não se consolidou na prática. Há, no entanto, elementos comuns em muitos mapas, desde as questões conceituais até a simbolização. Concluiu-se que, de modo majoritário, os mapas nacionais possuem sofisticados sistemas de legenda, os mapas de regiões podem atender objetivos específicos e que os mapas estaduais priorizam grandes unidades morfográficas, tornando implícitas as demais informações do relevo.

Na perspectiva geomorfológica, verificou-se que, do conjunto de 57 mapas analisados, pouco mais da metade (56%) dos documentos obtiveram êxito ao representar todos os aspectos que devem compor um mapa geomorfológico. Individualmente, a morfogênese (61,4%) e a morfografia (52,6%) foram os elementos enfatizados na maioria dos mapas avaliados — tal como na proposta metodológica apresentada. Na perspectiva temática, constatou-se que as variáveis visuais mais empregadas em mapas geomorfológicos são cores e formas e também que o processo de comunicação cartográfica é comumente prejudicado pelo excesso de informações a serem representadas.

A questão temática, portanto, é o primeiro ponto a ser destacado na proposta metodológica defendida pela tese. Embora sejam consideradas as possibilidades de representação geomorfológica em plataformas dinâmicas e informatizadas, como os SIGs, o mapa geomorfológico como documento estático, exaustivo e de síntese requer que o projeto cartográfico siga os princípios da Semiologia Gráfica, onde os símbolos expressem os conceitos geomorfológicos adequadamente. Assim, o sistema de legenda elaborado (condizente à escala

1:50.000) sumariza a concepção teórico-metodológica empregada, sendo o âmago do mapeamento.

Referente à classificação geomorfométrica que derivou os objetos do mapeamento geomorfológico, afirma-se que a qualidade do modelo digital do terreno e o rigor metodológico durante a etapa de classificação orientada a objeto foram os fatores preponderantes para a eficácia da proposta. O MDT utilizado foi interpolado pelo método *Topogrid* a partir de base vetorial planialtimétrica, adequando o tamanho da célula à escala predefinida, cujo processamento foi acompanhado de extensas fases de correção. No produto resultante, a principal potencialidade do MDT foi em relação às feições e processos fluviais. Pensando na replicação da proposta, destaca-se que em alguns modelos digitais de elevação globais (como o SRTM, que consideram a elevação dos objetos na superfície, incluindo a vegetação), talvez seja necessária uma adaptação nos parâmetros de classificação dos objetos de ordem fluvial.

Quanto ao cálculo dos atributos geomorfométricos, observou-se, primeiramente, que o tamanho da célula (para atributos de cálculo local) e o tamanho da janela móvel ou raio de análise de vizinhança (para atributos de cálculo regional) influi diretamente nos resultados. Há, dessa forma, uma dependência escalar (têmporo-espacial) que deve ser compatibilizada com os objetivos do mapeamento. Esse preceito é fundamental para a interpretação dos valores e para as consequentes classificações dos atributos geomorfométricos, ora discretizados por critérios determinísticos, ora por critérios estatísticos (como média e desvio padrão).

Nas etapas de classificação orientada a objeto, amparada pelo conceito da assinatura geomorfométrica, concluiu-se que os atributos geomorfométricos podem descrever e indicar, por si só, aspectos morfogenéticos, morfocronológicos, morfográficos e morfodinâmicos (além dos próprios morfométricos). Nessa fase, faz-se essencial o reconhecimento prévio dos objetos a serem modelados e todas suas características de ocorrência na paisagem — seja em campo, seja pela literatura —, para só então partir para a transcrição quantitativa de feições e/ou processos concebidos qualitativamente. Quanto mais sólido for o embasamento teórico sobre o objeto e quanto maior for o rigor e a clareza metodológica acerca da parametrização, melhores serão os resultados. Eis o pilar estruturante da proposta apresentada.

A criação de regras de classificação unificadas para uma área extensa e com contextos geomorfológicos muito distintos, como o estado do Paraná, 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 MDT ou do relevo local. Além disso, os resultados consolidam a análise digital do relevo alternativa viável, confiável e acessível para o mapeamento geomorfológico de modo semiautomatizado.

A morfogênese contemplou a modelagem de porções denudacionais, fluviais e fluviomarinhas, subdivididas em processos morfogenéticos construtivos e destrutivos; a morfocronologia estimou os níveis de paleosuperfícies de 0,25, 0,5, 5, 15 e 50 milhões de anos; na morfografia foram mapeados vales (planos, abertos e fechados), topos (aguçados e convexos e interfluviais), cristas, planícies de inundação (fluviais e fluviomarinhas), terraços (remanescentes de paleosuperfícies ou fluviomarinhas) e cones de dejeção; a modelagem da morfodinâmica representou a erosão potencial e os pontos suscetíveis à corrida de detritos; a morfometria, por fim, foi indicada com curvas de nível, pontos cotados (altimetria e elevação acima do nível de base local), além do relevo sombreado como camada subjacente. Adicionalmente ainda foi acrescentado, nos mapas geomorfológicos, informações sobre a geologia e geomorfologia regional, perfis topográficos e fotografias.

Em cada grande unidade morfoescultural do estado do Paraná, em síntese, o mapeamento realizado permitiu: i) na Planície Litorânea, representar os objetos ligados à dinâmica fluviomarinha com as sutis variações de relevo e as principais feições características; ii) na Serra do Mar, representar os testemunhos da paisagem relict, os efeitos da erosão diferencial e da dissecação do relevo com os processos atuantes e as pronunciadas feições; iii) no Primeiro Planalto, representar as diferenças e complexidades do relevo entre a porção norte e sul, como consequência das variações litológicas e das bacias hidrográficas dos rios Iguaçu e Ribeira; iv) no Segundo Planalto, representar a influência das camadas sedimentares e dos diques de diabásio na configuração geomorfológica local; v) no Terceiro Planalto, representar os padrões de relevo, com os objetos decorrentes, associados à influência do nível de base do rio Paraná e às características dos derrames basálticos da formação Serra Geral e aos arenitos do Grupo Bauru.

6 REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. O relevo brasileiro e seus problemas. In: AZEVEDO, A. (Org.). **Brasil - a terra e o homem**. 1964.
- AB'SABER, A. N. Problemas do mapeamento geomorfológico no Brasil. **Geomorfologia**, n. 6, p. 1-16, 1969.
- AB'SABER, A. N. Megageomorfolgia do território brasileiro. In: CUNHA, S. B.; GUERRA, A. J. T. (Orgs.) **Geomorfologia do Brasil**. Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, p. 71-106, 1998.
- AB'SÁBER, A. N.; BIGARELLA, J. J. Superfícies aplainadas do primeiro planalto do Paraná. **Boletim Paranaense de Geografia**, v. 4/5, p. 116-125, 1961.
- ABRAHAM, E. M. **Mapa geomorfológico de Mendoza**. Inventario de Recursos de la Región Andina Argentina. Sistema Físico Ambiental de Cuyo – Provincia de Mendoza, 1996.
- AKGÜN, A.; TÜRK, N. Mapping erosion susceptibility by a multivariate statistical method: A case study from the Ayvalık region, NW Turkey. **Computers & Geosciences** 37, p. 1515–1524, 2011.
- ALLAART, L. **Combining terrestrial and marine glacial archives: A geomorphological map of the Nordenskiöldbreen forefield, Svalbard**. MSc. Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2016.
- ALMEIDA, F. F. M. **Fundamentos geológicos do relevo paulista**. In: Instituto Geográfico e Geológico. Geologia do Estado de São Paulo. Boletim IGG, v. 41, p. 167-263, 1964.
- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, n.28, v.2, p.135-150, 1998.
- ALMEIDA, G.; CORLAVÄN, N.; ORQUERA, A.; ZAVGORODNYAYA, S. **Inventario cartografico de la costa ecuatoriana**. Salinas, escala 1:200.000. Leyenda explicativa. Quito, 1978.
- ALONSO, J. A.; BERMÚDEZ, F. L.; RAFAELLI, S. **La degradación de los suelos por erosión hídrica**. Murcia: Universidad de de Murcia, 384 p., 2010.
- ANAND, R. R.; BROEKERT, P. (eds.) (2004). **Regolith landscape evolution across Australia: A compilation of regolith-landscape case studies and landscape evolution models**. Disponível em: <<http://crcleme.org.au/Pubs/Monographs/RegLandEvol.html>>. Acesso em: 15/06/2017.
- ANGULO, R. J.; SOARES, C. R.; MARONE, E.; SOUZA, M. C.; ODRESKI, L. L. R.; NOERNBERG, M. A. Paraná. In: MUEHE, D. (Org.). **Erosão e progradação do litoral brasileiro**. 1ed.Brasilia: Ministerio do Meio Ambiente, v. 1, p. 347-400, 2006.

ANGULO, J. A. Mapa do cenozóico do litoral do estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 55, p. 25-42, 2004.

ANNYS, K.; FRANKL, A.; SPALEVIĆ, V.; ČUROVIĆ, M.; BOROTA, D.; NYSSSEN, J. Geomorphology of the Durmitor Mountains and surrounding plateau Jezerska Površ (Montenegro). **Journal of Maps**, 10:4, p. 600-611, 2014.

ARCHELA, R. S. Contribuições da semiologia gráfica para a cartografia brasileira. Geografia (Londrina), Londrina - PR, v. 10, n.1, p. 5-11, 2001.

ARCHELA, R. S.; ARCHELA, E. Correntes da cartografia teórica e seus reflexos na pesquisa. **Geografia (Londrina)**, v. 11, n.2, p. 161-170, 2002.

ARGYRIOU, A. V.; TEEUW, R. M.; RUST, D.; SARRIS, A. GIS multi-criteria decision analysis for assessment and mapping of neotectonic landscape deformation. **Geomorphology**, 253, p. 262–27, 2016.

ARIOLI, E. E. **Arquitetura faciológica da seqüência vulcânica e o significado exploratório das anomalias geoquímicas de Elementos do Grupo da Platina (EGP) e metais associados no sistema magmático Serra Geral, estado do Paraná, Brasil**. Tese de Doutorado em Geologia. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2008.

ARRELL, K. E.; FISHER, P.; TATE, N.; BASTIN, L. A *fuzzy* c-means classification of elevation derivatives to extract the morphometric classification of landforms in Snowdonia, Wales. **Computers and Geosciences** 33, p. 1366–1381, 2007.

ASSELEN, S.; SEIJMONSBERGEN, A. C. Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DTM. **Geomorphology** 78, p. 309–320, 2006.

AUCELLI, P. P. C.; CESARANO, M.; PAOLA, G.; FILOCAMO, F.; ROSSKOPF, C. M. Geomorphological map of the central sector of the Matese Mountains (Southern Italy): an example of complex landscape evolution in a Mediterranean mountain environment. **Journal of Maps**, 9:4, p. 604-616, 2013.

BADEA, L., SANDU, M. The general geomorphological map of Romania on a medium scale (1:200,000). **Revue Roumaine de Géographie**, n. 36, 1992.

BARBOSA, G. V.; SILVA, T. C.; NATALI FILHO, T.; DEL'ARCO, D. M.; COSTA, R. C. R. **Evolução da metodologia para mapeamento geomorfológico do Projeto Radambrasil**. Boletim Técnico, Série Geomorfologia. Salvador n. 1, 187 p., 1984.

BARKA, I.; VLADOVIČ, J.; MÁLIŠ, F. Landform classification and its application in predictive mapping of soil and forest units. **GIS Ostrava**, 1, 23 – 26., 2011.

BENTIVENGA, M.; CAPOLONGO, D.; PALLADINO, G.; PICCARRETA, M. Geomorphological map of the area between Craco and Pisticci (Basilicata, Italy). **Journal of Maps**, 11:2, p. 267-277, 2015.

BERTIN, J. **Semiologie graphique**: Les diagrammes, les reseaux, les cartes. Paris: Mouton, 1967.

BERTRAND, G. Paysage et géographie physique globale. Esquisse méthodologique. **Rev. Géograph. des Pyrénées et du Sud-Ouest**, 39(3). p. 249-272, 1968.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J., A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin** 24 (1), 43–69, 1979.

BIFFI, V. H. R.; PAISANI, J. C. Superfícies de cimeira do Planalto das Araucárias - Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, p. 465-481, 2018.

BIGARELLA, J. J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. 2 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, vol. 3, 2007.

BIGARELLA, J. J.; MOUSINHO, M. R.; SILVA, J. X. Pediplanos, pedimentos e seus depósitos correlativos no Brasil. **Boletim Paranaense de Geografia**, n. 16 e 17, p. 117-151, 1965.

BIGARELLA, J.J; BECKER, R.D; MATOS, D.J.; WERNER, A. **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. 1978.

BISHOP, M. P.; JAMES, A.; SHRODER, J. F.; WALSH, S. J. Geospatial technologies and geomorphological mapping: concepts, issues and research directions. **Geomorphology** 137, p. 5–26, 2012.

BOCCO, G.; MENDOZA, M.; VELÁZQUEZ, A. Remote sensing and GIS-base regional geomorphological mapping: a tool for land use planning in developing countries. **Geomorphology** 39, p. 211-219, 2001.

BOLONGARO-CREVENNA, A.; TORRES-RODRÍGUEZ, V.; SORANI, V.; FRAME, D.; ORTIZ, M. A. Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico. **Geomorphology** 67 (3-4), p. 407-422, 2005.

BORTOLINI, W; SILVEIRA, C. T.; SILVEIRA, R. M. P. Emprego de técnicas geomorfométricas na identificação de padrões de relevo. **Revista Ra'e Ga**, v. 41 Temático de Geomorfologia, 131-150, 2017.

BORTOLINI, W; SILVEIRA, C. T.; SILVEIRA, R. M. P.; SILVA, J. M. Técnicas Geomorfométricas para a identificação de padrões de relevo: aplicação nas aartas Curitiba e Cerro Azul, estado do Paraná. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 36, p. 15-32, 2018.

BURIAN, L; MITUSOV, A. V.; POESEN, J. Relationships of attributes of gullies with morphometric variables. In: JASIEWICZ, J.; ZWOLIŃSKI, Z.; MITASOVA, H.; HENGL, T. (eds). **Geomorphometry for Geosciences**, 2015.

BUZJAK, N.; PAHERNIK, M.; BOČIĆ, N.; FAIVRE, S. **Geomorphological map of Croatia 1:100.000**. 8th IAG International Conference on Geomorphology, 2013.

CABALLERO, M. E. M. V.; GÓMEZ-ZOTANO, J.; OLMEDO-COBO, J. A.; PEZZI-CERETTO, M. C. Geomorphology of the Sierra Gorda karst, South Spain. **Journal of Maps**, 12:5, p. 1143-1151, 2016.

CALVO, A. B.; GONZÁLEZ, A. P. Geomorphology of the Sierra de Atapuerca and the Middle Arlanzón Valley (Burgos, Spain). **Journal of Maps**, 11:4, p. 535-544, 2015.

CARDOSO, J. A Construção de Gráficos e Linguagem Visual. **História: Questões & Debate**, Curitiba 5(8):37-58, 1984.

CAVALLI, M.; GOLDIN, B.; COMITI, F.; BRARDINONI, F.; MARCHI, L. Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models. **Geomorphology** 291, p. 4–16, 2017.

CHAPLOT, V. Impact of terrain attributes, parent material and soil types on gully erosion. **Geomorphology** 186, p. 1–11, 2013.

CHEN, A.; DARBON, J.; MOREL, J.-M. Landscape evolution models: a review of their fundamental equations. **Geomorphology** 219, p. 68–86, 2014.

CHENG, W.; ZHOU, C.; CHAI, H.; ZHAO, S.; LIU, H.; ZHOU, Z.. Research and compilation of the Geomorphologic Atlas of the People's Republic of China (1:1,000,000). **Journal of Geographical Sciences**, 21 (1), p. 89-100, 2011.

CHORLEY, R. J.; MAIM, D. E. C.; POGORZELSKI, .H. A. A new standard for measuring drainage basin shape. **American Journal of Science**, v. 255., p. 138-14, 1957.

CÍA, J. C.; ANDRÉS, A. J. Geomorphological map of the Alta Ribagorza (Central Pyrenees, Spain). **Journal of Maps**, 4:1, p. 235-247, 2008.

COELHO, A. L. N.; GOULART, A. C. O.; BERGAMASCHI, R. B.; TEUBNER JUNIOR, F. J. **Mapeamento geomorfológico do estado do Espírito Santo**. Nota técnica 28. Instituto Jones dos Santos Neves, Vitória, 2012.

COLTORTI, M.; PIERUCCINI, P.; BERAKHI, O.; DRAMIS, F.; ASRAT, A. The Geomorphological Map of Mt. Amba Aradam Southern Slope (Tigray, Ethiopia). **Journal of Maps**, 5:1, p. 56-65, 2009.

COLTRINARI, L. Cartografia geomorfológica detalhada: a representação gráfica do relevo entre 1950-1970. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.12, n.3, p.121-130, 2011.

CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V.; BÖHNER, J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, **Geoscientific Model Development**, 8, 1991-2007, 2015.

CORINE. **Soil Erosion Risk and Important Land Resources in the Southeastern Regions of the European Community**. EUR 13233; Luxemburgo, Bélgica, 1992.

COSTA, R. C. R.; BUSS, M. D.; ROSA, R. O. **Geomorfologia**. In: Levantamento de Recursos Naturais, Volume 35: folha SG.22 Curitiba, parte da folha SG.21 Asunción e folha SG.23 Iguape (Relatório técnico do Projeto RADAMBRASIL). Org.: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Rio de Janeiro, 2005.

COUTO, E. V. Evolução denudacional de longo prazo e a relação solo-relevo no noroeste do Paraná. **Tese de Doutorado**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Mapas geomorfológicos do estado do Rio de Janeiro**: escala 1:250.000, 2000.

DEKAVALLA, M.; ARGIALAS, D. Object-based classification of global undersea topography and geomorphological features from the SRTM30_PLUS data. **Geomorphology** 288, p. 66–82, 2017.

DEMEK, J. (Ed.) **Manual of Detailed Geomorphological Mapping**. IGU Commission for Geomorphological Mapping. Academia, Prague, 1972.

DEMEK, J. **Generalization of Geomorphological Maps**. In DEMEK, J. (ed.) Progress made in geomorphological mapping. Brno, Proceedings of the IGU Commission on Applied Geomorphology, Sub-commission of Geomorphological Mapping. p. 36-72, 1967.

DEMEK, J.; KIRCHNER, K.; MACKOVČIN, P.; SLAVIK, P. Concept of a new general geomorphological map of the Czech Republic. **Problems of Geography**, n.. 2-3, p. 55 -60, 2009.

DEMOULIN, A.; BOVY, B.; RIXHON, G.; COMET, Y. An automated method to extract fluvial terraces from digital elevation models: The Vesdre valley, a case study in eastern Belgium. **Geomorphology** 91, p. 51–64, 2007.

DENG, Y. New trends in digital terrain analysis: landform definition, representation, and classification. **Progress in Physical Geography** 31(4), p. 405–419, 2007.

DENT, B. D. **Cartography thematic map design**. 5^a ed. Nova York: McGraw-Hill, 1999.

DESMET, P. J. J.; POESEN, J.; GOVERS, G.; VANDAELE, K. Importance of slope gradient and contributing area for optimal prediction of the initiation and trajectory of ephemeral gullies. **Catena** 37, p. 377–392, 1999.

DEVOTO, S.; BIOLCHI, S.; BRUSCHI, V. M.; FURLANI, S.; MANTOVANI, M.; PIACENTINI, D.; PASUTO, A.; SOLDATI, M. Geomorphological map of the NW Coast of the Island of Malta (Mediterranean Sea). **Journal of Maps**, 8:1,p. 33-40, 2012.

DIKAU, R. **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, p. 51-77, 1989.

DIKAU, R. 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, 1990.

DIKAU, R.; BRABB, E. E.; MARK, R. K.; PIKE, R. J. Morphometric landform analysis of New Mexico. **Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband**. 101: 109-126, 1995.

DINIZ, M. T. M.; OLIVEIRA, G. P.; MAIA, R. P.; FERREIRA, B. Mapeamento Geomorfológico do estado do Rio Grande do Norte. **Revista Brasileira de Geomorfologia** (Online), São Paulo, v. 18, n.4, p. 689-701, 2017.

DOORNKAMP, J. C. **Geomorphological mapping**. In: OMINDE, S. H. (ed.) *Studies in East African geography and development*. Heinmann Educational Books, 1971.

DRAGUT, L.; EISANK, C. Automated object-based classification of topography from SRTM data. **Geomorphology** 141-142, p. 21–33, 2012.

DRAGUT, L.; EISANK, C. Object representations at multiple scales from digital elevation models. **Geomorphology** 129, p. 183–189, 2011.

DRAGUT, L.; BLASCHKE, T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. **Geomorphology**, 81, 330–344, 2006.

DRAMIS, F.; BISCI, C. **Cartografia Geomorfológica**. Manuale di Introduzione al Rilevamento ed alla Rappresentazione Degli Aspetti Fisici del Territorio. Pitagora Editrice, Bologna, 1998.

DRAMIS, F.; DOMENICO, G.; ANTONELLO, C. Nature and Aims of Geomorphological Mapping. In: SMITH, M. J.; PARON, P.; GRIFFITHS, J. eds. **Geomorphological Mapping: Methods and Applications**, Developments in Earth Surface Processes vol 15, Elsevier, 2011.

EHSANI, A. H.; QUIEL, F. A semi-automatic method for analysis of landscape elements using Shuttle Radar Topography Mission and Landsat ETM+ data. **Computers & Geosciences** 35. p. 373–389, 2009.

EHSANI, A. H.; QUIEL, F. Geomorphometric feature analysis using morphometric parameterization and artificial neural networks. **Geomorphology** 99, p.1–12, 2008.

ELEZ, J.; SILVA, P. G.; HUERTA, P.; PERUCHA, M. A.; CIVIS, J.; ROQUERO, E.; RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A.; BARDAJÍ, T.; GINER-ROBLES, J. L.; MARTÍNEZ-GRANA. Quantitative paleotopography and paleogeography around the Gibraltar Arc (South Spain) during the Messinian Salinity Crisis. **Geomorphology** 275, p. 26–45, 2016.

EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital Terrain Modelling: Acquisition, Manipulation and Applications**. Artech House, Inc., Norwood-Massachusetts. 2005.

EVANS, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: CHORLEY, R. J. (Ed.). **Spatial analysis in geomorphology**. London: Harper & Row, Publishers, 1972.

EVANS, I. S. Geomorphometry and landform mapping: What is a landform? **Geomorphology** 137 (2012) 94–106, 2012.

EVANS, I. S.; HENGL, T.; GORSEVSKI, P. Applications in Geomorphology. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 497-526, 2009.

EVANS, I. S.; MINÁR, J. 2011. A classification of geomorphometric variables. **International Geomorphometry** (Geomorphometry.org.), p. 105-108, 2011.

FACCINI, F.; PICCAZZO, M.; ROBBIANO, A.; ROCCATI, A. Applied geomorphological map of the Portofino Municipal Territory (Italy). **Journal of Maps**, 4:1, p. 451-462, 2008.

FERNANDES, L. A.; COUTO, E.V.; SANTOS, L. J. C. Três Morrinhos, Terra Rica, PR - Arenitos silicificados de dunas do Deserto Caiuá testemunham nível de superfície de aplainamento K-T. In: WINGE, M.; SCHOBENHAUS, C.; SOUZA, C. R. G.; FERNANDES, A. C. S.; BERBERT-BORN, M.; SALLUN FILHO, W.; QUEIROZ, E. T. (Eds.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. Disponível em: <<http://sigep.cprm.gov.br/sitio058/sitio058.pdf>>. 2012.

FLORENZANO, T. G. Cartografia. In: FLORENZANO, T. G (Org). **Geomorfologia: Conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. Cap. 4, p. 105-120.

FONSECA, A. F. Geomorphology of the Montejunto massif (Portugal). **Journal of Maps**, 7:1, p. 138-147, 2011.

FONSECA, A. F.; ZÊZERE, J. L.; NEVES, M. Geomorphology of the Arrábida Chain (Portugal). **Journal of Maps**, 10:1, p. 103-108, 2014.

FORTE, F.; PENNETTA, L. Geomorphological Map of the Salento Peninsula (southern Italy). **Journal of Maps**, 3:1, p. 173-180, 2007.

FUMIYA, M. H. **gênese dos ferricretes e sua relação com transformações da paisagem no noroeste do Paraná**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015

GALLANT, A. L.; BROWN, D. D.; HOFFER, R. M. Automated Mapping of Hammond's Landforms. **IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters**, vol. 2, n. 4, p. 384-388, 2005.

GALLANT, J. C.; DOWLING, T. I. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. **Water Resources Research**, vol. 39, n. 12, 4-1 – 4-13, 2003.

GALLANT, J. C.; HUTCHINSON, M. F. Scale dependence in terrain analysis. **Mathematics and Computers in Simulation** 43. p. 313-321, 1997.

GARCÍA, A. M. S.; GONZÁLEZ, A. M.; MARTÍN, F. N.; RINCÓN, A. S.; RODRÍGUEZ, A. S. **Mapa geomorfológico de España y del margen continental**. Escala 1:1.000.000. Instituto Geológico y Minero de España, 2005.

GARCÍA, J. A. R.; CERDÁN, F. P. **Normas de organización de la información del Mapa Geomorfológico Nacional digital**. Informe técnico, Instituto Geológico y Minero de España, 42 p., 2006.

GEILHAUSEN, M.; OTTO, J. C.; SCHROTT, L. **Geomorphological map of the Pasterze landsystem**. Journal of Maps, 2012.

GERASSIMOV, I. P.; MESCHERIKOV, J. L. **Morphostructure**. In: FAIRBRIDGE, R. W. (Ed.). The encyclopedia of geomorphology. New York: Reinhold Book Corp., 1968.

GIANO, S. I. Geomorphology of the Agri intermontane basin (val d'Agri-Lagonegrese National Park, Southern Italy). **Journal of Maps**, 12:4, p. 639-648, 2016.

GIRARDI, G. **Cartografia geográfica: considerações críticas e proposta para ressignificação de práticas cartográficas na formação do profissional em Geografia**. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2003.

GOMES, S. M. A.; SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T. Aplicação de técnicas geomorfométricas para classificação de formas do relevo em Campo Largo, estado do Paraná - Brasil. **Revista Geografar**, v. 13, p. 75-97, 2018.

GRECU, F. Geomorphological Map of the Prahova Subcarpathians (Romania). **Journal of Maps**, 5:1, p. 108-116, 2009.

GROHMANN, C. H.; SAWAKUCHI, A. O. Influence of cell size on volume calculation using digital terrain models: A case of coastal dune fields. **Geomorphology** 180–181, p. 130–136, 2013.

GROHMANN, C.H.; RICCOMINI, C. Análise digital de terreno e evolução de longo-termo de relevo do centro-leste brasileiro. **Geologia USP**, Série científica, v. 12, n. 2, p. 12-150, 2012.

GROHMANN, C.H.; RICCOMINI, C.; CHAMANI, M. A. C. Regional scale analysis of landform configuration with base-level (isobase) maps. **Hydrology and Earth System Sciences** 15, p. 1493–1504, 2011.

GUIMARÃES, F. S.; CORDEIRO, C. M.; BUENO, G. T.; CARVALHO, V. L. M.; NERO, M. A. Uma proposta para automatização do Índice de Dissecção do Relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia** (Online), São Paulo, v.18, n.1, (Jan-Mar) p.155-167, 2017.

GUSTAVSSON, M.; KOLSTRUP, E.; SEIJMONSBERGEN, A. C. A new symbol-and-GIS based detailed geomorphological mapping system: renewal of a scientific discipline for understanding landscape development. **Geomorphology** 77, p. 90-111, 2006.

GUSTAVSSON, M.; SEIJMONSBERGEN, A. C.; KOLSTRUP, E. Structure and contents of a new geomorphological GIS database linked to a geomorphological map with an example from Liden, central Sweden. **Geomorphology** 95, p. 335-349, 2008.

HAIDER, V. L.; KROPÁČEK, J.; DUNKL, I.; WAGNER, B.; EYNATTEN, H. Identification of peneplains by multi-parameter assessment of digital elevation models. **Earth Surface Processes and Landforms**, 40, p. 1477–1492, 2015.

HAMMOND, E. H. Analysis of properties in land form geography: an application to broad-scale landform mapping. **Ann. Assoc. Am. Geogr.** 54, 11 19, 1964.

HANI, A. F. M.; SATHYAMOORTHY, D.; ASIRVADAM, V. S. Computing surface roughness of individual cells of Digital Elevation Models via multiscale analysis. **Computers & Geosciences** 43, p. 137-146, 2012.

HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers & Geosciences** 32, p. 1283–1298, 2006.

HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 3-30, 2009.

HERMES, R. **Método acrobático maluco**. Instituto Galático Brasileiro. Petrópolis: P. das Galáxias, 2014.

HIJMANS, R. J.; CAMERON, S. E.; PARRA, J. L.; JONES, P. G.; JARVIS, A. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology** 25: 1965-1978, 2005.

HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. **Proceedings of the IEEE**, n. 69, v.01, p. 14-47, 1981.

HRVATIN, M.; PERKO, D. Suitability of Hammond's method for determining landform units in Slovenia. **Acta geographica Slovenica**, 49-2, p. 343–366, 2009.

HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, 106, p. 211-272, 1989.

HUZITA, K.; KASAMA, T. **Kôbe oyobi rinsetsu chiiki chisitu-zu, 1/50,000** (Geologic map of kobe and the adjacent area, 1/50.000). Geologic map. 3rd ed. Japão: Secretaria de Planejamento, Distrito Municipal de Kobe, 1977.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual Técnico de Geomorfologia**. 2ª ed. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 175 p., 2009.

IPPOLITI, G. A.; COSTA, L.M.; SCHAEFER, C. E .G. R.; FERNANDES FILHO, E. I.; GAGGERO, M. R.; SOUZA, E. Análise digital do terreno: ferramenta na identificação de pedoformas em microbacia na região de “Mar de Morros” (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p. 269-276, 2005.

JARSVE, E. M.; KROGLI, S. O.; ETZELM-ULLER, B.; GABRIELSEN, R. H. Automatic identification of topographic surfaces related to the sub-Cambrian peneplain (SCP) in southern Norway — Surface generation algorithms and implications. **Geomorphology** 211, p. 89–99, 2014.

JASIEWICZ, J.; NETZEL, P.; STEPINSKI, T. F. Landscapes similarity, retrieval, and machine mapping of physiographic units. **Geomorphology** 221, 104–112, 2014.

JENNESS, J. **DEM Surface Tools**. Jenness Enterprises. Disponível em: http://www.jennessent.com/arccgis/surface_area.htm. 2012.

JENSEN, E. H. **Geomorphological map of Eskifjörður**. Icelandic Meteorological Office, 2002.

JORDAN, G. Digital Terrain Analysis in a GIS Environment. Concepts and Development. In: PECKHAM, R. J.; JORDAN, G. **Digital Terrain Modelling**. Development and Applications in a Policy Support Environment. Berlim: Springer, 2007.

JUSTUS, J. O. **Subsídios para interpretação morfogenética através da utilização de imagens de radar**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1985.

KARYMBALIS, E.; GAKI-PAPANASTASSIOU, K.; TSANAKAS, K.; FERENTINOU, M. Geomorphology of the Pinios River delta, Central Greece. **Journal of Maps**, 12:sup1, p. 12-21, 2016.

KLIMASZEWSKI, M. Detailed geomorphological maps. **ITC Journal**, n. 3, p. 265-271, 1982.

KLIMASZEWSKI, M. Landform list and signs used in the detailed geomorphological map. **Geographical Studies**, n. 46 (Problems of geomorphological mapping), p. 139-177, 1963a.

KLIMASZEWSKI, M. The principles of the geomorphological map of Poland. **Geographical Studies**, n. 46 (Problems of geomorphological mapping), p. 67-72, 1963b.

KLIMASZEWSKI, M. Thirty years of detailed geomorphological mapping. **Geographia Polonica**, n. 58, p. 11-18, 1990.

KLINGSEISEN, B.; METTERNICHT, G.; PAULUS, G. Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. **Environmental Modelling & Software** 23, p. 109-121, 2008.

KOCIUBA, W.; KUBISZ, W.; ZAGÓRSKI, P. Use of terrestrial laser scanning (TLS) for monitoring and modelling of geomorphic processes and phenomena at a small and medium spatial scale in Polar environment (Scott River — Spitsbergen). **Geomorphology** 212, p. 84–96, 2014.

KOHLER, H. C. A Escala na Análise Geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Volume 2, n. 1, p. 21-33, 2001.

KOOMEN, A. J. M.; MAAS, G. J. **Geomorfologische Kaart Nederland (GKN)**. Achtergronddocument bij het landsdekkende digitale bestand. Wageningen, Alterra, Alterra Report no. 1039, 38 p., 2004.

LAMBIEL, C.; MAILLARD, B.; KUMMERT, M.; REYNARD, E. Geomorphology of the Hérens valley (Swiss Alps). **Journal of Maps**, 12:1, p. 160-172, 2016.

LATRUBESSE, E. M.; CARVALHO, T. M. **Geomorfologia do Estado de Goiás e Distrito Federal**. GOIÁS (Estado). Secretaria de Indústria de Comércio. Superintendência de Geologia e Mineração. Goiânia, 2006.

LESER, H.; STÄBLEIN, G. (eds.). **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.

LINDSAY, J. B.; COCKBURN, J. M. H.; RUSSELL, H. A. J. An integral image approach to performing multi-scale topographic position analysis. **Geomorphology** 245, p. 51–61, 2015.

LUO, W.; PINGEL, T.; HEO, J.; HOWARD, A.; JUNG, J. A progressive black top hat transformation algorithm for estimating valley volumes on Mars. **Computers & Geosciences**, n. 75, p. 17–23, 2015.

LUO, W.; PINGEL, T.; HEO, J.; HOWARD, A.; JUNG, J. A progressive black top hat transformation algorithm for estimating valley volumes on Mars. **Computers & Geosciences** 75, p. 17–23, 2015.

MAACK, R. R. **Geografia Física do Estado do Paraná**. 2. ed. Curitiba: Ed. Olympio, 1981.

MACÊDO, R. J. A.; FLOQUET, S. Análise digital de terreno utilizando a linguagem computacional R: exemplo de aplicação. **Revista Brasileira de Geomorfologia** (Online), São Paulo, v. 18, n. 2, p.443-463, 2017.

MACMILLAN, R. A.; SHARY, P. A. Landform and landform elements in geomorphometry. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 227-254, 2009.

MAILLARD, B.; LAMBIEL, C.; MARTIN, S.; PELLITERO, R.; REYNARD, E.; SCHOENEICH, P. **The ArcGIS version of the geomorphological mapping legend of the University of Lausanne**. Technical report, Université de Lausanne, 2011.

MARK, D. M. Geomorphometric parameters: a review and evaluation. **Geografiska Annaler**, 57A(3-4), 165-177, 1975.

MARK, D. M., SMITH, B. A science of topography: from qualitative ontology to digital representations. In: Bishop, M.P., Shroder, J.F. (Eds.), **Geographic Information Science and Mountain Geomorphology**. Springer-Praxis, Chichester, England, pp. 75-97, 2004.

MARTINELLI, M. **Curso de Cartografia Temática**. São Paulo: Contexto, 1991.

MARTINELLI, M. **Mapas da geografia e cartografia temática**. 4ª ed. São Paulo: Contexto, 2007.

MARTINELLI, M.; GRAÇA, A. J. S. Cartografia temática: uma breve história repleta de inovações. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 67/4, Edição de Cartografia Histórica, p. 913-928, 2015.

MARTINONI, D. **Models and experiments for quality handling in digital terrain modelling**. Ph.D. Thesis. University of Zürich, 2002.

MATSUURA, T.; ANIYA, M. Automated segmentation of hillslope profiles across ridges and valleys using a digital elevation model. **Geomorphology** 177 (178), p. 167-177, 2012.

MAY, J. H. A geomorphological map of the Quebrada de Purmamarca, Jujuy, NW Argentina. **Journal of Maps**, 4:1, 211-224, 2008.

MELO, M. S.; GUIMARÃES, G. B.; PONTES, H. S.; MASSUQUETO, L. L.; FIGURIM, I.; BAGATIM, H. Q.; GIANNINI, P. C. F. Carste em rochas não-carbonáticas: o exemplo dos arenitos da Formação Furnas, Campos Gerais do Paraná/Brasil e as implicações para a região. **Espeleo-Tema** (São Paulo), v. 22, p. 81-97, 2011.

MENTLÍK, P.; JEDLIČKA, K.; MINÁR, J.; BARKA, I. Geomorphological information system: physical model and options of geomorphological analysis. **Geografie**, 111, n. 1, p. 15-32, 2006.

MESCERJAKOV, J. P. Les concepts de morphostruture et de morphosculture: un nouvel instrument de l'analyse géomorphologique. **Annales de Géographie**, Paris, t. 77, n. 423, p. 539-552, 1968.

MEYER, N. K.; SCHWANGHART, W.; KORUP, O.; ROMSTAD, B.; ETZELMÜLLER. Estimating the topographic predictability of debris flows. **Geomorphology** 207, p. 114–125, 2014.

MICELI, B. S.; DIAS, F. M.; SEABRA, F. M.; SANTOS, P. R. A.; FERNANDES, M. C. Avaliação vertical de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 63/01, 2011.

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A.; FRANCA, A. B.; Bacia do Paraná. **Boletim de Geociências da Petrobrás**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

MILIARESIS, G. C. Quantification of Terrain Processes. In: ZHOU, Q.; LEES, B.; TANG, G. (eds.). **Advances in Digital Terrain Analysis**. Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlin: Springer-Verlag, pp. 13-28, 2008.

MINÁR, J.; EVANS, I. S. Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. **Geomorphology** 95 (3–4), 236–259, 2008.

MINEROPAR – Minerais do Paraná S/A. **Atlas geológico do estado do Paraná**. 116 p. Curitiba, 2001.

MIRZAYEV, K. **Geomorphological Map of Syria**. Syrian Arab Republic, Department of Geological and Mineral Research, 1963.

MITASOVA, H.; HARMON, R. S.; WEAVER, K. J.; LIONS, N. J.; OVERTON, M. F. Scientific visualization of landscapes and landforms. **Geomorphology** 137, p. 122–137, 2012.

MOORE, I. D.; BURCH, G. J.; MACKENZIE, D. H. Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. **Transactions of the ASAE** 31 (4), 1098–1107, 1988.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes** 5 (1), p. 3–30, 1991.

MOURATIDIS, A.; BRIOLE, P.; KATSAMBALOS, K. SRTM 3" DEM (versions 1, 2, 3, 4) validation by means of extensive kinematic GPS measurements: a case study

from North Greece. **International Journal of Remote Sensing**, vol. 31, n. 23, p. 6205–6222, 2010.

MURO, S.; GRANDE, A.; BRAMBATI, A.; IBBA, A. Geomorphology map of the marine and transitional terraces and raised shorelines of the Península Juan Mazía, Tierra Del Fuego. Straits of Magellan – Chile. **Journal of Maps**, 11:5, p. 698-710, 2015.

NASCIMENTO, E. R.; REIS NETO, J. M.; REBELO, A. M. A.; SAMPAIO, T. V. M.; SILVEIRA, C. T. Parâmetros geomorfométricos do relevo no entendimento do nível de exposição dos sistemas cársticos na região limítrofe das bacias hidrográficas do Alto Iguazu e do Alto Ribeira - Região norte de Curitiba - PR. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 42, p. 81-90, 2012.

NASCIMENTO, E. R.; SALAMUNI, E.; QUEIROZ, G. L.; SILVA, P. A. H.; FIORI, A. P. Evidências de determinação morfotectônica e neotectônica no relevo da Serra do Mar no estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.14, n.3, p. 287-299, 2013.

NELSON, A.; REUTER, H. I.; GESSLER, P. DEM Production Methods and Sources. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 31-64, 2009.

NEUMAN, G. **Classificação de unidades morfológicas por análise digital do relevo na porção sudeste do Paraná**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná (Programa de Pós-Graduação em Geografia). Curitiba, 2017.

NICULITA, M. Effects of geomorphometric variables variability due to different computing algorithms in environmental modeling. **Procedia Environmental Sciences** 7, p. 335–340, 2011.

NIKOLSKAYA, O.; ASTAKHOV, V.; MANGERUD, J.; MATIOUCHKOV, A.; SVENDSEN, J. I. **Geomorphological Map of the Pechora Basin and Adjacent Areas**. Institute of Remote Sensing Methods for Geology (NIIKAM), St. Petersburg, 2002.

NIR, D. **Israel - Geomorphological Map**. Atlas of Israel. Survey of Israel, 1978.

NOERNBERG, M. A. **Processos Morfodinâmicos no Complexo Estuarino de Paranaguá – Paraná – Brasil: Um Estudo a Partir de Dados in situ e Landsat – TM**. Curitiba. Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Tese de Doutorado, 180 p., 2001.

NORINI, G.; ZULUAGA, M. C.; ORTIZ, I. J.; AQUINO, D. T.; LAGMAY, A. M. F. Delineation of alluvial fans from Digital Elevation Models with a GIS algorithm for the geomorphological mapping of the Earth and Mars. **Geomorphology** 273, p. 134–149, 2016.

NSU – Novosibirsk State University. **Геоморфологическая карта СССР. Масштаб 1:16.000.000.** Disponível em: <<https://nsu.ru/ff166dbd0419b06e4e084bd4b97f0603>>. Acesso em: 12/07/2018.

OKA-FIORI, C.; CANALI, N; KOZCIAK, S. Mapeamento Geomorfológico do Litoral Paranaense. **Sociedade & Natureza, Uberlândia**, v. 3, p. 182-186, 1996.

OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C.; CANALI, N. E.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, C. T.; BRISKI, S. J.; FELIPE, R. S.; SILVA, J. M. F.; ROSS, J. L. S. **Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná**: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000. MINEROPAR; Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 63 p., 2006.

OLAYA, V. **Sistemas de Información Geográfica**. Create Space Independent Publishing Platform, 2014.

OLAYA, V. Basic Land-Surface Parameters. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Series Developments in Soil Science, vol. 33, Amsterdam: Elsevier, 2009. Cap. 6, p. 141-169.

OLIVEIRA, I. J. A cartografia aplicada ao planejamento do turismo. **Boletim Goiano de Geografia**, vol. 25, n. 1-2, p. 30-46, 2005.

OLIVEIRA, F. A.; VIEIRA, C. V. Semi-detailed Geomorphological Map of Northeastern Santa Catarina State, Brazil—the Garuva Sheet. **Journal of Maps**, 5:1, 66-74, 2009.

OOSTEROM, A. P. **Geomorphological Map of South-East Kenya**. Coast Province Geoscience Research Project. Pudoc, Wageningen, 1988.

OTTO, J. C.; DIKAU, R. Geomorphologic System Analysis of a High Mountain Valley in the Swiss Alps. **Zeitschrift für Geomorphologie**, n. 48(3), p. 323-341, 2004.

OTTO, J. C.; GUSTAVSSON, M.; GEILHAUSEN, M. Cartography: Design, Symbolisation and Visualisation of Geomorphological Maps. In: SMITH, M. J.; PARON, P.; GRIFFITHS, J. eds. **Geomorphological Mapping: Methods and Applications**, Developments in Earth Surface Processes vol 15, Elsevier, 2011.

OTTO, J. C.; SMITH, M. J. Geomorphological Mapping. **Geomorphological Techniques**, cap. 2, seção 6, p. 1-10, British Society for Geomorphology, 2013.

PAISANI, J. C.; PONTELLI, M. E.; ANDRES, J. Superfícies aplainadas em zona morfoclimática subtropical úmida no planalto basáltico da bacia do Paraná (SW Paraná / NW Santa Catarina): primeira aproximação. **Geociências** (São Paulo. Online), v. 27, p. 541-553, 2008.

PAISANI, J. C.; PAISANI, S. D. L.; Osterrieth, M. L.; PONTELLI, M. E.; FUJITA, R. H. Dinâmica de rampa de colúvio na superfície de Palmas/Água Doce durante o quaternário tardio: bases para compreender a evolução das encostas no Planalto das Araucárias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, p. 783-799, 2017.

PARON, P.; CLAESSENS, L. **Makers and users of geomorphological maps**. In: SMITH, M. J.; PARON, P.; GRIFFITHS, J. eds. *Geomorphological Mapping: Methods and Applications, Developments in Earth Surface Processes* vol 15, Elsevier, 2011.

PEDERSEN, G. B. M. Semi-automatic classification of glaciovolcanic landforms: An object-based mapping approach based on geomorphometry. **Journal of Volcanology and Geothermal Research** 311, p. 29–40, 2016.

PELECH, A. S. Paleorrelevo pleistocênico e estimativas de dissecação vertical e volumétrica para o Holoceno em uma pequena bacia hidrográfica – médio vale do Rio Paraíba do Sul (RJ). **Quaternary and Environmental Geosciences**, 07(1-2), p. 6-13, 2016.

PENNOCK, D. J. Terrain attributes, landform segmentation, and soil redistribution. **Soil and Tillage Research** 69 (1–2), 15–26, 2003.

PERAZA, A. H. P.; DÍAZ, J. L.; SANTANA, J. R. H.; GARCÍA, A. R. M.; SEGUNDO, P. B. **Geomorfología**. In: HERRERO, E. A. S. *Nuevo atlas nacional de Cuba. La Habana: Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba y el Instituto Cubano de Geodesia y Cartografía*, 1989.

PEREGO, A.; ZERBONI, A.; CREMASCHI, M. Geomorphological Map of the Messak Settafet and Mellet (Central Sahara, SW Libya). **Journal of Maps**, 7:1, p. 464-475, 2011.

PIKE, R. J. Geomorphometry — diversity in quantitative surface analysis. **Progress in Physical Geography** 24 (1), 1–20, 2000.

PIKE, R. J. The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. **Mathematical Geology** 20, 491–511, 1988.

PIKE, R. J.; EVANS, I., HENGL, T. Geomorphometry: A Brief Guide. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 3-30, 2009.

PIPAUD, I.; LEHMKUHL, F. Object-based delineation and classification of alluvial fans by application of mean-shift segmentation and support vector machines. **Geomorphology** 293, p. 178–200, 2017.

PIPAUD, I.; LOIBL, D.; LEHMKUHL, F. Evaluation of TanDEM-X elevation data for geomorphological mapping and interpretation in high mountain environments – a case study from SE Tibet, China. **Geomorphology** 246, p. 232–254, 2015.

PODOBNIKAR, T.; SZÉKELY, B. Towards the automated geomorphometric extraction of talus slopes in Martian landscapes. **Planetary and Space Science** 105, p. 148–158, 2015.

QUEIROZ, D. R. E. Cartografia Temática: evolução e caminhos de pesquisa. **Boletim de Geografia**, Maringá, v. 25, n.1, p. 138-151, 2007.

QUEIROZ NETO, J. P.; JOURNAUX, A. **Carta geomorfológica de São Pedro, escala 1:50.000**. Instituto de Geografia da Universidade de São Paulo, 1977.

QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. **Hydrological Processes** 5, 59–79, 1991.

RAAFLAUB, L. D.; COLLINS, M. J. The effect of error in gridded digital elevation models on the estimation of topographic parameters. **Environmental Modelling & Software** 21, p.710-732, 2006.

RACZKOWSKA, Z.; ZWOLIŃSKI, Z. Digital Geomorphological Map of Poland. **Geographia Polonica**, 88, 2, pp. 205-210, 2015.

RASEMANN, S.; SCHMIDT, J.; SCHROTT, L.; DIKAU, R. Geomorphometry in mountain terrain. In: BISHOP, M. P., SHRODER, J. F. (Eds.), **GIS & Mountain Geomorphology**. Springer, Berlin, pp. 101–145, 2004.

RIFFEL, S. B. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He Dating of Weathered Landsurfaces on the Rifted Continental Margin of Southern Brazil. **Tese de Doutorado**. The University of Queensland, Brisbane, 2012.

RIFFEL, S. B.; VASCONCELOS, P. M.; CARMO, I. O.; FARLEY, K. A. Combined $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 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, p. 52–63, 2015.

RIFFEL, S. B.; VASCONCELOS, P. M.; CARMO, I. O.; FARLEY, K. A. Goethite (U–Th)/He geochronology and precipitation mechanisms during weathering of basalts. **Chemical Geology**, n. 446, p.18–32, 2016.

RIGOL-SANCHEZ, J. P.; STUART, N.; PULIDO-BOSCH, A. ArcGeomorphometry: a toolbox for geomorphometric characterisation of DEMs in the ArcGIS environment. **Computers & Geosciences**, 85, 155–163, 2015.

RILEY, S. J.; DEGLORIA, S. D.; ELLIOT, R. A terrain ruggedness index that quantifies topographic heterogeneity. **Intermountain Journal of Sciences**, v.5, n. 1-4, p. 23-27, 1999.

RIQUELME, R.; DARROZES, J.; MAIRE, E.; HÉRAIL, G.; SOULA, J. C. 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**, n. 35 (1), p. 105-121, 2008.

ROBAINA, L. E. S; TRENTIN, R.; LAURENT, F. Compartimentação do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, através do uso de *geomorphons* obtidos em classificação topográfica automatizada. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 2, p. 287-298, 2016.

RODRIGUES, S. C. Cartografia e simbologia geomorfológica. Evoluindo da cartografia tradicional para o uso de simbologia digital. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.11, n.1, p.3-10, 2010.

RODRIGUEZ, F.; MAIRE, E.; COURJAULT-RAD'E, P.; DARROZES, J. 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 - 9-4, 2002.

ROMSTAD, B. Improving relief classification with contextual merging. **Proceedings of ScanGIS'2001** — The 8th Scandinavian Research Conference on Geographical Information Science. Ås, Norway, p. 3–13, 2001.

ROSS, J. S. Registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 6, p. 17-29, 1992.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa geomorfológico do estado de São Paulo: Escala 1:500.000. Volume I e Volume II.** Depto. Geografia FFLHC-USP, IPT e FAPESP, 1997.

SAHA, K.; WELLS, N. A.; MUNRO-STASIUK, M. An object-oriented approach to automated landform mapping: a case study of drumlins. **Computers and Geosciences** 37, p. 1324–1336, 2011.

SALAMUNI, E.; NASCIMENTO, E. R.; SILVA, P. A. H.; OKA-FIORI, C. Geomorfologia do município de Curitiba-PR. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 4, p. 327-341, 2013.

SALGADO, A. A. R. Superfícies de aplainamento: antigos paradigmas revistos pela ótica dos novos conhecimentos geomorfológicos. **Geografias**, v. 3, n. 1, p. 74-78, 2007.

SALGADO, A. A. R.; MARENT B. R.; CHEREM L. F.; BOURLÉS, D.; SANTOS, L. J. C.; BRAUCHER, R.; BARRETOS, H. N. Denudation and retreat of the Serra do Mar escarpment in southern Brazil derived from in situ-produced ¹⁰Be concentration in river sediment. **Earth Surface Processes and Landforms**, n. 39, p. 311–319, 2014.

SALLUN FILHO, W.; KARMANN, I. Dolinas em arenitos da Bacia do Paraná: evidências de carste subjacente em Jardim (MS) e Ponta Grossa (PR). **Revista Brasileira de Geociências**, 37(3): p. 551-564, 2007.

SAMPAIO, T. V. M. Diretrizes e procedimentos metodológicos para a cartografia de síntese com atributos quantitativos via álgebra de mapas e análise multicritério. **Boletim de Geografia (Online)**, v. 30, p. 121-131, 2012.

SANTOS, L. J. C.; OKA-FIORI, C.; CANALI, N. E.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, C. T.; SILVA, J. M. F.; ROSS, J. L. S. Mapeamento geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, n. 2, p. 3-12, 2006.

SCHMIDT, J., HEWITT, A. *Fuzzy* land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. **Geoderma** 121 (3–4), p. 243–256, 2004.

SCHMIDT, J.; ANDREW, R. Multi-scale landform characterization. **Area** 37, 341–350, 2005.

SCHMIDT, J.; DIKAU, R. Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models — semantics, methods, future needs. In: DIKAU, R.; SAURER, H. (Eds.), **GIS for Earth Surface Systems** — Analysis and Modelling of the Natural Environment. Schweizbart'sche Verlagsbuchhandlung, pp. 153–173, 1999.

SEIJMONSBERGEN, A. C.; GRAAFF, L. W. S. Geomorphological mapping and geophysical profiling for the evaluation of natural hazards in an alpine catchment. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, n. 6, p. 185-193, 2006.

SEIJMONSBERGEN, A. C.; HENGL, T.; ANDERS, N. S. **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 vol 15, Elsevier, 2011.

SENA-SOUZA, J. P.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; VASCONCELOS, V.; COUTO JUNIOR, A. F.; GOMES, R. A. T.; GUIMARAES, R. F. Comparação dos métodos de classificação por ângulo espectral e distância euclidiana no mapeamento das formas de terreno. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, p. 591-613, 2016.

SERGEOMIN – Servicio Geológico Minero. **Mapa geomorfológico de Bolivia**. Disponível em: <<http://ide.sergeomin.gob.bo/hmsgm/index.html>>. Acesso em: 13/06/2018.

SGN - Servizio Geologico Nazionale. **Carta Geomorfologica d'Italia 1:50,000**: Guida al rilevamento. Quaderno n. 3 del SGN, a cura del Gruppo di Lavoro per la Cartografia Geomorfologica. Istituto Poligrafico e Zecca dello Stato 42, Roma, 1994.

SHARY, P. A.; SHARAYA, L. S.; MITUSOV, A. V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. **Geoderma** 107 (1–2), p. 1–32, 2002.

SILVEIRA, C. T. **Análise digital do relevo na predição de unidades preliminares de mapeamento de solos**: integração de atributos topográficos em sistemas de informações geográficas e redes neurais artificiais. Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; FERREIRA, A. M.; GÓIS, J. R.; MIO, G.; SILVEIRA, R. M. P.; MASSULINI, N. E. B.; LEONARDI, T. M. H. Emprego de atributos topográficos no mapeamento da susceptibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacareí/Paraná. **Sociedade & Natureza**, v. 24, p. 623-639, 2013.

SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; SCHILIPACK, P.; DIAS, S. M. Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da Serra do Mar Paranaense

apoiado na análise digital do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, p. 3-22, 2014.

SILVEIRA, C. T.; SILVEIRA, R. M. P. Índice de Posição Topográfica (IPT) para classificação geomorfométrica das formas de relevo no estado do Paraná - Brasil. **Revista Ra'e Ga**, volume Especial Temático de Geomorfologia, 2017.

SILVEIRA, C. T.; SILVEIRA, R. M. P.; TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S. Classificação automatizada de elementos de relevo no estado do Paraná (Brasil) por meio da aplicação da proposta dos *geomorphons*. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n.01, p. 33-57, 2018.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C. Análise digital do relevo empregada no mapeamento de unidades geomorfológicas. **Revista Geografar**, v. 7, p. 43-68, 2012.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C. Emprego de técnicas de inferência espacial para identificação de unidades de relevo apoiado em atributos topográficos e árvore de decisão. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, p. 87-101, 2014.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T. Clasificación morfológica del relieve uruguayo basada em modelos digitales de elevación y técnicas morfométricas. **Geografía y Sistemas de Información Geográfica**. (GESIG-UNLU, Luján). Año 6, n. 6, Sección I: p. 19-36, 2014.

SILVEIRA, R. M. P. **Análise digital do relevo como apoio para a cartografia geomorfológica da porção central da Serra do Mar Paranaense**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T. Automated hierarchical classification of landforms in the state of Paraná supported by digital terrain modeling. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, p. 1509-1523, 2015.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T. Análise digital do relevo aplicada à cartografia geomorfológica da porção central da Serra do Mar Paranaense. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 17, n. 4, 615-629, 2016a.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T. Análise comparativa entre modelos digitais de elevação com distintas características de processamento e aquisição. **Boletim de Geografia** (Online), v. 33, p. 106-121, 2016b.

SILVEIRA, R. M. P. **Cartografia Temática**. 1ª ed. Curitiba: Editora Intersaberes, 2019.

SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; MONTOVANI, L. E.; SIRTOLI, A. R. A.; OKA-FIORI, C. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. **Scientia agraria**, v. 9, n. 3, p. 317-329, 2008.

SLOCUM, T. **Thematic Cartography and Visualization**. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1998.

SLOCUM, T., R.; MCMASTER, R. B.; KESSLER, F. C.; HOWARD, H. H. **Thematic Cartography and Geovisualization**. 3ª edição. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 576 p., 2009.

SMITH, B.; MARK, D. M. Do mountains exist? Towards an ontology of landforms. **Environment and Planning B: Planning and Design** 30 (3), 411–427, 2003.

SMITH, M. J. **Digital mapping: visualisation, interpretation and quantification of landforms**. In: SMITH, M. J.; PARON, P.; GRIFFITHS, J. eds. *Geomorphological Mapping: Methods and Applications, Developments in Earth Surface Processes* vol 15, Elsevier, 2011.

SMITH, M. J.; CLARK, C. D. Methods for the visualization of digital elevation models for landform mapping. **Earth Surface Processes and Landforms** 30, p. 885–900, 2005.

SOARES, C. R.; PARANHOS FILHO, A. C.; SOUZA, M. C.; BRANCO, J. C.; FABIANOVICZ, R.; PRAZERES FILHO, H. J.; KOGUT, J. S. Variações da linha de costa no Balneário Pontal do Sul (PR) no período de 1953-1993: Um balanço sedimentar. **Boletim Paranaense de Geociências**, Curitiba, 42:161-171, 1994.

SOARES, P. C.; RIFFEL, S. B. Hypsometric Curves as a Tool for Paleosurface Mapping. **Mathematical Geology**, v. 38, n. 6, p. 679-695, 2006.

SOPCHAKI, C. H. **Influência do N amostral e das características do relevo na qualidade de modelos digitais do terreno**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2016.

SOUZA, L. H. F., FERREIRA, I. L.; RODRIGUES, S. C. Cartografia Digital Aplicada ao Mapeamento Geomorfológico. **Revista Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 16, n 30 , p. 133-144, 2004.

SPEIGHT, J. G. Parametric description of land form. In G. A. Stewart (Ed.), **Land evaluation**, pp. 239–250. Australia: Macmillan, 1968.

STEFANELLO, A. C.; PASSOS, E.; PALHARES, J. M. Estudo preliminar da ocorrência de superfícies aplanadas na porção oriental do estado do Paraná. **Ciência Geográfica** - Bauru, Vol. XVI, p. 21-32, 2012.

STEPINSKI, T. F.; BAGARIA, C. Segmentation-based unsupervised terrain classification for generation of physiographic maps. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters** 6, 733–737, 2009.

ST-ONGE, D. A. Theories, paradigms, mapping, and geomorphology. **Canadian Geographer**, v. 30, p. 307-315, 1981.

STRAHLER, A. N. Quantitative slope analysis. **Bulletin of the Geological Society of America** 67, 571–596, 1956.

TARBOTON, D. G. A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models. **Water Resources Research**, **33(2)**: 309-319, 1997.

TOBLER, W. R. The development of analytical cartography — a personal note. **Cartography and Geographic Information Science** 27 (3), 189–194, 2000.

TOMLIN, C. D. **Geographic information systems and cartographic modeling**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1990.

TRENTIN, R.; ROBAINA, L. E. S. Classification of the landform units supported by geomorphometric attributes. **Mercator** (Fortaleza. Online), v. 15, p. 53-66, 2016.

TRICART, J. **Principes et méthodes de la géomorphologie**. Paris: Masson Ed., 201p., 1965.

TRICART, J. **Normes pour l'établissement de la carte géomorphologique de la France**. Mem. Doc. CNRS 12, 1-267, 1970.

TUCKER, G. E.; HANCOCK, G. R. Modelling landscape evolution. **Earth Surface Processes and Landforms** 35, p. 28–50, 2010.

VALADÃO, R. C. **Evolução de longo-termo do relevo do Brasil oriental (desnudação, superfícies de aplanamento e soerguimentos crustais)**. Tese (Doutorado), 243 p. Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1998.

VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n.3, p.539-546, 2003.

VANHONI, F.; MENDONÇA, F. O clima do litoral do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 3, p. 49-63, 2008.

VANNAMETEE, E.; BABEL, L. V.; HENDRIKS, M. R.; SCHUUR, J.; JONG, S.M.; BIERKENS, M. F. P.; KARSSENBERG, D. Semi-automated mapping of landforms using multiple point geostatistics. **Geomorphology** 221, p. 298-319, 2014.

VASCONCELOS, V.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E. S. COUTO JUNIOR, A. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. Sistema de classificação geomorfológica baseado em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 2, p. 171-186, 2012.

VERSTAPPEN, H. T. **Remote Sensing in Geomorphology**. Elsevier, Amsterdam, 1977.

VERSTAPPEN, H. T.; HOSCHTITZKY, M.E.D. **Geomorphological Map of SriLanka**. Department of Geography ITC, Enschede, The Netherlands, 1987.

VERSTAPPEN, H. T. Old and New Trends in Geomorphological and Landform Mapping. In: SMITH, M. J.; PARON, P.; GRIFFITHS, J. (eds.) **Geomorphological Mapping: Methods and Applications**, Developments in Earth Surface Processes vol 15, Elsevier, 2011. Cap. 2. p. 13-35.

VILORIA, J. A.; VILORIA-BOTELLO, A.; PINEDA, M. C.; VALERA, A. Digital modelling of landscape and soil in a mountainous region: a neuro-fuzzy approach. **Geomorphology** 253, p. 199–207, 2016.

WAICHEL, B. L.; LIMA, E. F.; LUBACHESKY, R.; SOMMER, C. A. Pahoehoe flows from the central Paraná Continental Flood Basalts. **Bulletin of Volcanology** (Print), Heidelberg, v. 68, n.7-8, p. 599-610, 2006a.

WAICHEL, B. L. Tipos de derrame e reconhecimento de estruturas nos basaltos da Formação Serra Geral - Terminologia e aspectos de campo. **Pesquisas em Geociências** (UFRGS), v. 33, p. 123-133, 2006b.

WEISS, A. **Topographic Position and Landforms Analysis**. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA, 2001.

WIECZOREK, M.; MIGON, P. Automatic relief classification vs.expert and field based landform classification for the medium-altitude mountain range, the Sudetes, SW Poland. **Geomorphology** 206, p. 133–146, 2014.

WILSON, J. P. Digital terrain modelling. **Geomorphology**, 137, p.107–121, 2012.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (eds.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: John Wiley & Sons, p.1-27, 2000.

WINGE, M. **Glossário Geológico Ilustrado**. Disponível em: <<http://sigep.cprm.gov.br/glossario/>>. Acesso em: 21/09/2018. Serviço Geológico do Brasil, 2001.

WU, Q.; DENG, C.; CHEN, Z. Automated delineation of karst sinkholes from LiDAR-derived digital elevation models. **Geomorphology** 266, p. 1–10, 2016.

ZHOU, Q.; LEES, B.; TANG, G. (eds.). **Advances in Digital Terrain Analysis**. Series: Lecture Notes in Geoinformation and Cartography. Berlim: Springer-Verlag, 2008.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 - Mapa geomorfológico da carta Paranaguá

APÊNDICE 2 - Mapa geomorfológico da carta Represa do Capivari

APÊNDICE 3 - Mapa geomorfológico da carta Curitiba

APÊNDICE 4 - Mapa geomorfológico da carta Campo Largo

APÊNDICE 5 - Mapa geomorfológico da carta União da Vitória

APÊNDICE 6 - Mapa geomorfológico da carta Itapara

APÊNDICE 7 - Mapa geomorfológico da carta Borrazópolis

APÊNDICE 8 - Mapa geomorfológico da carta Guairaçá

