



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/10.08.20.05-TDI

EXTRAÇÃO DE SETORES DE VERTENTES A PARTIR DE MDE COMO UNIDADE DE TERRENO PARA GEOMORFOMETRIA REGIONAL

Ana Carolina Calderaro Carvalho Silva

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. Márcio de Morisson
Valeriano, aprovada em 10 de
setembro de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/43CQNGP>>

INPE
São José dos Campos
2020

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)
Divisão de Biblioteca (DIBIB)
CEP 12.227-010
São José dos Campos - SP - Brasil
Tel.:(012) 3208-6923/7348
E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

Membros:

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)
Cauê Silva Fróes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA
CIÊNCIA, TECNOLOGIA
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/10.08.20.05-TDI

EXTRAÇÃO DE SETORES DE VERTENTES A PARTIR DE MDE COMO UNIDADE DE TERRENO PARA GEOMORFOMETRIA REGIONAL

Ana Carolina Calderaro Carvalho Silva

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. Márcio de Morisson
Valeriano, aprovada em 10 de
setembro de 2020.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/43CQNGP>>

INPE
São José dos Campos
2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Si38e Silva, Ana Carolina Calderaro Carvalho.
Extração de setores de vertentes a partir de MDE como unidade de terreno para geomorfometria regional / Ana Carolina Calderaro Carvalho Silva. – São José dos Campos : INPE, 2020. xx+72 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2020/10.08.20.05-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2020.
Orientador : Dr. Márcio de Morisson Valeriano.

1. Vertente. 2. Segmentação. 3. Mapeamento do relevo.
4. Geomorfometria regional. I.Título.

CDU 528.8:551.43



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Ana Carolina Calderaro Carvalho Silva**

Título: "EXTRAÇÃO DE SETORES DE VERTENTES A PARTIR DE MDE COMO UNIDADE DE TERRENO PARA GEOMORFOMETRIA REGIONAL"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Sensoriamento Remoto

Dr. Thales Sehn Körting



Presidente / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado **Reprovado**

Dr. Márcio de Morisson Valeriano



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado **Reprovado**

Dra. Dilce de Fátima Rossetti

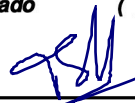


Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Video - Conferência

Aprovado **Reprovado**

Dra. Patrícia Moreira Procópio Calazans



Convidado(a) / XR.Lab / Belo Horizonte - MG

Participação por Video - Conferência

Aprovado **Reprovado**

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar.
Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.”*

Madre Teresa de Calcutá

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Dr. Márcio de Morisson Valeriano, pela oportunidade, ensinamentos e ajuda ao longo de todo esse período. Agradeço pelas palavras de incentivo e pelo conhecimento compartilhado, não só técnico quanto de vida.

Ao Conselho de Aperfeiçoamento de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de mestrado, que viabilizou a realização deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pelos ensinamentos proporcionados por meio do corpo docente, pela infraestrutura e pelo apoio na realização deste trabalho.

Ao mestre Fabio Corrêa Alves, por todas as conversas e ajudas prestadas durante o desenvolvimento desta pesquisa.

À minha família que sempre me apoiou e incentivou, independente das circunstâncias.

À banca examinadora desta dissertação, pela disponibilidade e pelas contribuições.

RESUMO

Os mapas geomorfológicos oficiais disponíveis do Brasil provêm de levantamentos que antecedem à ampla oferta de dados orbitais ópticos e modelos digitais de elevação (MDE). O caráter analógico dos dados então usados impôs, entre outras limitações, a análise estritamente qualitativa e a escala inflexível de seus produtos. Esses mapas foram pouco revisados, apesar da crescente disponibilização de novos produtos de sensoriamento remoto. Em particular, há carência de metodologias de mapeamento com base em MDEs. A classificação de relevo usando informação regional requer a integração de dados locais em determinadas feições (unidades de terreno ou de mapeamento) a partir da estrutura celular (pixels) e de suas derivações básicas. Com isso, é possível revelar padrões de distribuição regional estruturados em compartimentos geomorfológicos. O presente trabalho objetivou o desenvolvimento de uma metodologia de regionalização do relevo em unidades de terreno a partir da análise geomorfométrica de MDE. A hipótese testada é de que unidades de terreno (polígonos) obtidas a partir de elementos de vertente podem facilitar a caracterização do relevo em seus diversos níveis de abrangência. Objetivos específicos incluíram o desenvolvimento de metodologias para a classificação do terreno e para a delimitação de setores de vertentes por meio de informação local, a ser utilizada como unidade elementar para o primeiro nível de regionalização. A região escolhida para esse estudo é delimitada pelo Escudo do Paraná, a sudeste do estado do Paraná, e associada a unidades sedimentares paleozoicas e cenozoicas. Os resultados incluíram o agrupamento das vertentes por critérios de homogeneidade em unidades mais complexas, que foram reagrupadas em compartimentos mais amplos na estrutura hierárquica, e a geração de um mapa geomorfológico.

Palavras-chave: vertente, segmentação, mapeamento do relevo, geomorfometria regional.

EXTRACTION OF HILLSLOPES SECTORS FROM DEM AS A TERRAIN UNIT FOR REGIONAL GEOMORFOMETRY

ABSTRACT

The official geomorphological maps available in Brazil come from surveys that preclude the wide offer of optical orbital data and digital elevation models (MDE). The analog character of the data then used imposed, among other limitations, the strictly qualitative analysis and the inflexible scale of its products. These maps were little revised, despite the growing evolution of remote sensing. In particular, there is a lack of mapping methodologies based on MDEs. Relief classification using this type of information requires the integration of local data in certain features (terrain or mapping units), based on the celular structure (pixels) and their basic derivations. Regional characterization allows the identification of patterns of distribution within geomorphological compartments. This work aimed to develop a methodology for regionalization of relief in terrain units based on the geomorphometric analysis of DEM. The tested hypothesis is that terrain units (polygons) obtained from hillslope elements can facilitate the characterization of the relief in its various levels of coverage. Specific objectives included the development of methodologies for land classification and delimitation of hillslopes sectors by means of local information, to be used as an elementary unit for the first level of regionalization. The region chosen for this study is delimited by the Parana Shield, to the southeast of the Parana state, and associated with paleozoic and cenozoic sedimentary units. The results were the grouping of the hillslopes in more complex units using homogeneity criteria, which were in turn grouped into larger compartments in the hierarchical structure, and the generation of a geomorphological map.

Keywords: hillslope, segmentation, land mapping, regional geomorphometry.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Exemplos de aplicações de janelas móveis em planos de informação, com tamanhos variando em 3x3, 5x5 e 7x7. Os cálculos são baseados nas cotas alcançadas pela janela móvel e armazenadas no pixel central em todas as posições dos dados de entrada.	4
Figura 2.2 - Esquema simplificado de representação das principais variáveis geomorfológicas.	6
Figura 2.3 – Representação da altura topográfica.	8
Figura 2.4 – Caracterização da predominância do relevo.	9
Figura 2.5 - Relação espaço-temporal de algumas unidades de relevo.....	12
Figura 2.6 – Perfil típico de vertente, com convexidade no topo e concavidade na base, sendo ambas separadas por um ponto simples de inflexão ou segmento.	13
Figura 2.7 – Desenvolvimento de unidades de terreno em progressão hierárquica com a vertente como feição elementar, desde dados locais do MDE até a escala de relevo regional, associado às abordagens de processamento consideradas para cada nível.....	19
Figura 3.1 – Localização e hipsometria geral da área de estudo (vermelha).....	20
Figura 3.2 – Mapa geológico da área de estudo.	23
Figura 3.3 – Exemplos de morfoesculturas: A) Serra do Mar e Morros Isolados e B) Primeiro Planalto Paranaense (Planalto Dissecado do Alto Ribeira).	24
Figura 3.4 – Mapa geomorfológico da área de estudo.	25
Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia para a criação e avaliação das unidades de terreno.	30
Figura 4.2 - Orientação de vertente (A) e sua decomposição em seno e cosseno (B). A área usada como exemplo pertence à sub-unidade morfoescultural Serra do Mar Paranaense.	32
Figura 4.3 – Exemplificação da metodologia proposta para a regionalização das variáveis locais.	35

Figura 5.1 - Decomposição da orientação de vertentes nas componentes ortogonais em relevo correspondente ao Planalto Dissecado de Adrianópolis.	39
Figura 5.2 – Comparação dos resultados dos testes de segmentação de vertentes considerando-se três níveis dos parâmetros de forma, de compacidade e de escala em uma área da região dos Blocos Soerguidos da Serra do Mar, mantendo-se os outros parâmetros fixos.	41
Figura 5.3 – Comparação dos histogramas de coerência dos testes de compacidade e escala obtidos com base em dados derivados da área analisada na região dos Blocos Soerguidos da Serra do Mar.	42
Figura 5.4 – Mapa da coerência calculada a partir dos segmentos de tamanho 5 para a área de estudo. Os polígonos amarelos indicam as áreas descritas na Figura 5.5.	44
Figura 5.5 – Detalhe da segmentação dos setores da área de estudo destacados na Figura 5.4.	45
Figura 5.6 – Comparação da curvatura vertical extraída da sub-unidade morfoescultural Serra do Mar regionalizada pelo filtro média 5x5 (A), 7x7 (B) e pela média zonal dos setores de vertente (C).	47
Figura 5.7 – Comparação da altura topográfica calculada por filtros de 13x13 (A), de 15x15 (B) e pela média zonal dos setores de vertente (C), para a região da sub-unidade morfoescultural Blocos Soerguidos da Serra do Mar.	48
Figura 5.8 – Estratificação da elevação média das vertentes na área de estudo (linha vermelha).	49
Figura 5.9 – Transecto topográfico I-I' (ver localização na figura 5.8A).	50
Figura 5.10 - Declividade e curvatura vertical regionalizadas para a área de estudo, com sobreposição dos domínios geomorfológicos indicados na Figura 3.4. Os polígonos destacados indicam a localização das Figuras 5.11 e 5.12.	51
Figura 5.11 – Comparação entre a geologia e a regionalização da declividade em um setor dos planaltos dissecados da área de estudo (ver localização na figura 5.10).	52
Figura 5.12 – Comparação entre a geologia e a regionalização da curvatura vertical. ..	53

Figura 5.13 – Resultado do cálculo das variáveis regionais para a área de estudo, utilizando setores de vertente, sobrepostas pelos limites dos domínios geomorfológicos (Figura 3.4).	55
Figura 5.14 – Comparação entre a geomorfologia (A) e a predominância do relevo (B). Linhas brancas em B indicam limites geomorfológicos oficiais.	56
Figura 5.15 – Comparação entre a geomorfologia (A) e a altura topográfica sobreposta pelos limites geomorfológicos oficiais (B).	57
Figura 5.16 – Comparação dos resultados da análise de agrupamento com base nas variáveis geomorfométricas estudadas. A) Imagem em <i>RGB</i> composta das 7 variáveis de entrada sobreposta pela geomorfologia (linha branca); B) Cluster com 15 classes; C) Cluster com 16 classes e D) Cluster com 17 classes.	59
Figura 5.17 – Comparação entre a classificação geomorfológica deste trabalho (A) e o mapa geomorfológico oficial da área de estudo (B). A legenda foi simplificada para fins de comparação.	62

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Variáveis regionais descritas neste trabalho, suas principais características e equações.....	10
Tabela 2.2 – Exemplos de elementos de terreno, em ordem de escala e extensão.....	17
Tabela 3.1 – Principais características geomorfológicas da área de estudo.....	27
Tabela 5.1 - Análise de correlação das variáveis geomorfométricas testadas para a área de estudo.....	58
Tabela 5.2 – Relação de número de clusters com as entidades geomorfológicas da área de estudo.....	60

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	3
2.1 Geomorfometria.....	3
2.1.1 Geomorfometria local.....	3
2.1.2 Geomorfometria regional	6
2.1.3 Unidades de mapeamento.....	11
2.2 Análises e recursos	13
2.2.1 MDEs.....	13
2.2.2 Recursos e métodos para geração de unidades de mapeamento.....	15
2.2.3 Caracterização das unidades	18
3 ÁREA DE ESTUDO	20
3.1 Localização.....	20
3.2 Geologia	21
3.3 Geomorfologia.....	23
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	28
4.1 Dados	28
4.2 Recursos	29
4.3 Metodologias	29
4.3.1 Pré-processamento geral.....	31
4.3.2 Elaboração de unidades de mapeamento	31
4.3.3 Caracterização de unidades	34
4.3.4. Testes e aplicações.....	36

4.3.4.1 Coerência	36
4.3.4.2 Comparação com filtros	36
4.3.4.3 Classificação das unidades de terreno	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1 Delimitação das vertentes	38
5.2 Caracterização das unidades de terreno	46
5.2.1 Variáveis locais regionalizadas	46
5.2.2 Variáveis regionais	53
5.2.3 Agrupamento das unidades	57
6 CONCLUSÕES	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

1 INTRODUÇÃO

Modelos digitais de elevação (MDE) têm sido cada vez mais empregados na caracterização e mapeamento do relevo (PAUDEL ET AL., 2016; GEACH et al., 2017; KOUKOUVELAS et al., 2018; GARCIA; GROHMANN, 2019). Levantamentos de cobertura global, como os adquiridos pela missão de topografia de radar de ônibus espacial - SRTM (FARR; KOBRICK, 2000), fornecem MDE em áreas até então desprovidas de mapas topográficos. Os recursos de MDE são desenvolvidos em sistemas de informação geográfica (SIG), que permitem diversas operações e integração de dados visando estudos do meio físico em escalas locais e regionais.

A geomorfometria, ou o estudo numérico do relevo (EVANS, 1972), precede a disponibilização do MDE-SRTM. Porém, a aquisição desses dados e o seu processamento em ambiente SIG tem contribuído para o franco desenvolvimento dessa ciência, que tem potencial de aplicação especialmente para a confecção de mapas geomorfológicos e geológicos. MDEs permitem a extração de um grande número de informações quantitativas sobre o relevo. Apesar disso, variáveis geomorfométricas têm sido ainda pouco utilizadas na elaboração de mapas de estudo do meio físico no Brasil.

O mapeamento geomorfológico baseia-se em unidades de relevo, definidas por padrões e formas que seguem escalas hierárquicas. Atributos topográficos correspondentes a padrões de relevo requerem desenvolvimentos específicos ao tipo e nível de feição que se deseja caracterizar. Isto se deve à variação dos atributos com mudanças de escala (local ou regional) e do tamanho da janela do filtro (MACMILLAN et al., 2004). Por exemplo, a curvatura de uma encosta pode ser côncava, quando observada em uma escala de 1:10000, mas convexa em escala regional. Logo, existe a necessidade do desenvolvimento de metodologias que permitam identificar unidades de relevo em diversas escalas. A distinção de unidades de relevo em condições particularizadas necessita da seleção de variáveis-chave que caracterizem unidades de terreno elementares, ou seja, regiões homogêneas que, em conjunto, definam outras regiões.

As formas de relevo são reconhecidas como unidade de terreno em escalas variáveis, potencialmente adequadas para a integração regional de dados geomorfométricos (CAMARGO, 2008; FERNANDES, 2013; VALERIANO; ROSSETTI, 2017; MOREIRA, 2018; GERENTE, 2018). No entanto, poucas metodologias são desenvolvidas para a caracterização geomorfométrica regionalizada com base em vertentes (SILVEIRA; SILVEIRA, 2016). Elementos de vertentes podem ser adequados como unidades de terreno ao longo de escalas crescentes de diferentes ordens e contribuir para análises regionais do relevo.

O objetivo geral dessa pesquisa foi desenvolver uma metodologia baseada no uso dos elementos de vertente como variável-chave para o estabelecimento de unidades de terreno.

Dentre os objetivos específicos, destacam-se:

- a) Experimentar técnicas de processamento de MDE na delimitação de objetos adequados às diversas escalas de análise ou aos diversos níveis de abrangência necessários para a caracterização do relevo, os quais contemplam desde a informação local (pixel) até o mapeamento de unidades de terreno;
- b) Identificar e testar variáveis geomorfométricas que melhor caracterizem o relevo a partir de informação local;
- c) Testar unidades de terreno para a regionalização de variáveis geomorfométricas locais e de variáveis geomorfométricas regionais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Geomorfometria

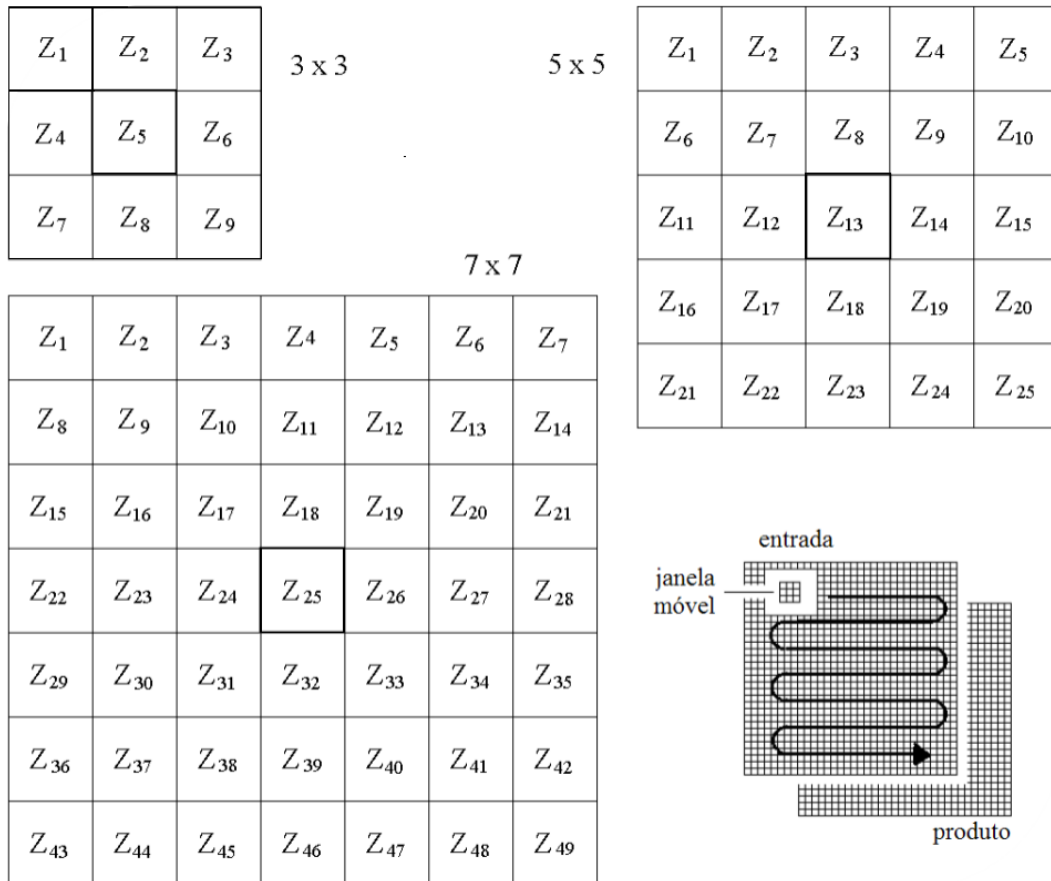
A geomorfometria é definida como a ciência de quantificação topográfica que pode ser interpretada como a análise numérica da geometria do relevo. Resultado da combinação de ciências como matemática, computação e da terra, ela foi concebida em função da demanda de estudo dos padrões de relevo por meio de modelos topográficos digitais, fornecendo informações, por exemplo, à geomorfologia, geologia, exploração do assoalho oceânico e ao mapeamento de risco naturais (EVANS, 1972; PIKE, 1995; PIKE, 2000). Com o avanço atual da tecnologia, os MDEs são a principal fonte de dado para análises geomorfológicas e aplicações, sendo o termo análise digital de terreno muitas vezes preferido (LANE et al., 1998; PIKE, 2000).

O desenvolvimento de técnicas de processamento de imagens proporcionou a extração de variáveis ou descritores geomorfológicos a partir dos MDEs. Uma divisão funcional entre as técnicas de análise e descritores geomorfológicos possibilitando ainda classificá-los em variáveis locais ou regionais (PIKE, 2000).

2.1.1 Geomorfometria local

A geomorfometria local refere-se à escala de estudo da população de pixels delimitados pela vizinhança imediata do ponto central. As variáveis topográficas locais podem ser obtidas por operações de vizinhança por janelas móveis ou, coloquialmente, filtros, e o resultado de cada operação é armazenado no pixel central (Figura 2.1). As janelas móveis podem variar de tamanho entre 3x3, 5x5, 7x7, etc. (PIKE, 2000).

Figura 2.1 - Exemplos de aplicações de janelas móveis em planos de informação, com tamanhos variando em 3x3, 5x5 e 7x7. Os cálculos são baseados nas cotas alcançadas pela janela móvel e armazenadas no pixel central em todas as posições dos dados de entrada.



$$Z'(3 \times 3) = a z_1 + b z_2 + c z_3 + d z_4 + e z_5 + f z_6 + g z_7 + h z_8 + i z_9$$

Fonte: Valeriano e Albuquerque (2015).

A altimetria (Z) é a medida da elevação de um ponto na superfície terrestre a partir de um *datum* (em geral, o nível do mar). A partir dela, são geradas as demais variáveis. Assim, além da própria altimetria (derivação de ordem zero), as principais variáveis geomorfométricas locais incluem a declividade, orientação de vertentes (derivadas de 1ª ordem) e as curvaturas vertical e horizontal (derivadas de 2ª ordem) (PIKE, 2000).

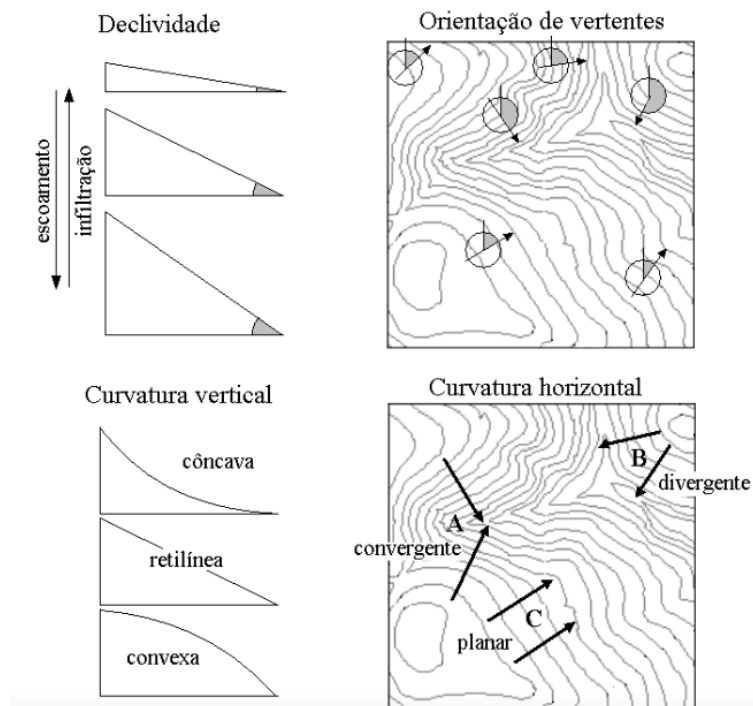
A primeira derivada da altimetria, a declividade (S), se refere à taxa de mudança da altitude com relação a uma distância horizontal. Ela é definida como o ângulo de

inclinação (zenital) da superfície do terreno em relação à horizontal. Seus valores podem ser representados de 0° a 90° ou em porcentagem. A orientação de vertentes (V) é definida como o ângulo azimutal correspondente à maior inclinação do terreno, no sentido descendente. É expressa em graus, de 0° a 360° . Ela compõe, junto à declividade, a geometria de exposição, como relevo sombreado (PIKE, 2000).

A curvatura vertical (K_v), ou curvatura em perfil, é a segunda derivada da altitude (altimetria) e pode ser definida como a medida de variação da declividade em uma dada distância horizontal. Refere-se à forma de uma superfície em perfil, quanto à sua expressão como côncava, convexa ou retilínea. Tem efeito direto na aceleração/desaceleração dos fluxos gravimétricos ao longo das vertentes e, portanto, no equilíbrio entre os processos de remoção e acúmulo de material (água/sedimentos). Por outro lado, a curvatura horizontal é definida como uma derivada de segunda ordem das curvas de nível. Pode ser descrita como a variação da orientação de vertentes ao longo de uma determinada distância e indica o formato da encosta observada em projeção horizontal quanto ao grau de convergência ou de divergência (ou neutra: planar) dos fluxos de transporte gravimétrico ao longo das vertentes. Ambas as curvaturas são expressas em uma medida de ângulo por distância ($^\circ/m$, por exemplo), variando entre valores positivos e negativos (nulo quando retilínea) (PIKE, 2000).

A Figura 2.2 apresenta um esquema simplificado de representação dessas variáveis geomorfométricas locais.

Figura 2.2 - Esquema simplificado de representação das principais variáveis geomorfométricas.



Fonte: Valeriano (2008).

2.1.2 Geomorfometria regional

O mapeamento, que é um dos elementos centrais da análise geomorfológica (MINAR; EVANS, 2008), envolve o conceito de agrupamento de atributos topográficos por similaridades e classificação em determinados padrões, baseando-se nas variáveis geomorfométricas e nas estatísticas calculadas a partir dos valores dos MDEs (EVANS, 1972; MACMILLAN ET AL., 2004; OLAYA, 2009). Uma das etapas do processo de mapeamento inclui a geração de variáveis regionais e regionalização de dados locais.

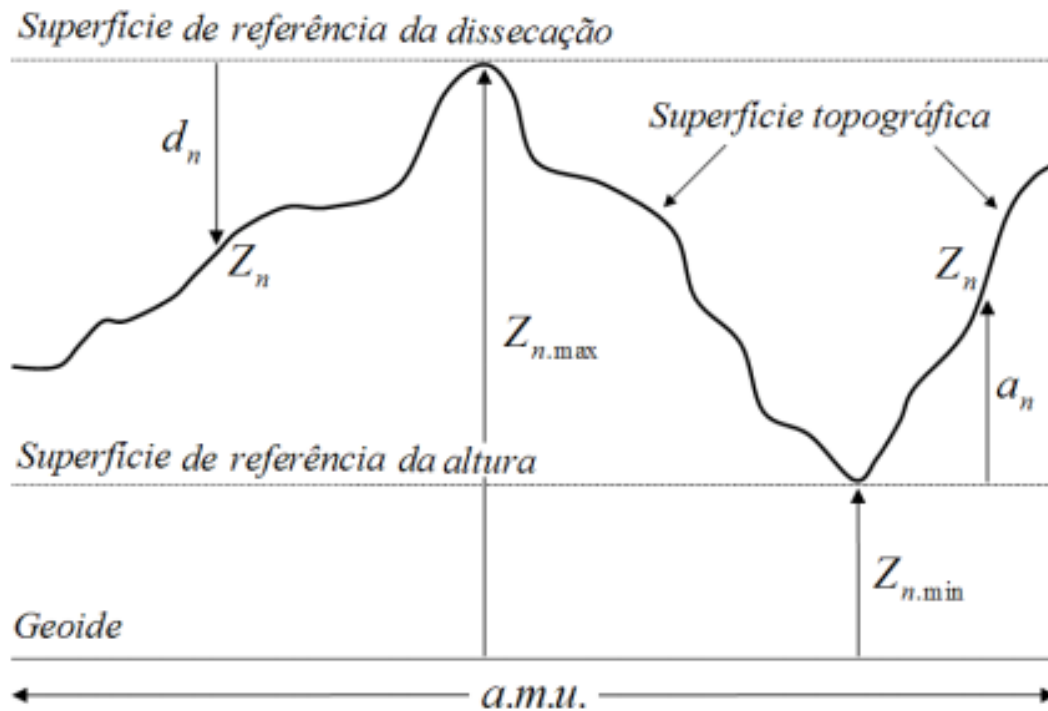
As variáveis não locais ou regionais são aquelas que possuem interações com maior número de células adjacentes, além das imediatamente vizinhas. Devido à sua natureza, muitas vezes é necessário a partição da área em unidades de terreno pré-definidas para seu cálculo, ou de mapeamento. Isso nem sempre é possível utilizando janelas móveis. Em SIG, costuma-se referi-las como segmentos. Exemplos de variáveis regionais

incluem: altura topográfica, relevo relativo, integral hipsométrica, predominância de relevo e rugosidade. Por outro lado, a regionalização das variáveis locais envolve a generalização da informação local, que também pode ser dada pelo uso das unidades de mapeamento ou unidades de terreno (PIKE, 2000).

A altura topográfica indica a distância vertical entre um ponto localizado sobre a superfície e sua projeção horizontal no plano de altitudes mínimas (Figura 2.3). Nesse sentido, pode ser obtida pela diferença entre a altimetria do MDE original e as altitudes mínimas presentes em uma determinada área de busca (p.e., janelas móveis ou segmentos) (MUÑOZ; VALERIANO, 2013).

O relevo relativo ou amplitude altimétrica é dado pela diferença entre a elevação máxima e mínima dentro de uma determinada área ou janela móvel. Se a área ou janela móvel definida para a geração desta variável for muito pequena (em relação às variações topográficas), é improvável que contemple feições inteiras do relevo, como por exemplo, uma encosta (EVANS, 1972). Neste sentido, é recomendável que o tamanho do polígono ou da janela móvel contemple, pelo menos, a distância média entre dois interflúvios vizinhos (MARK, 1975).

Figura 2.3 – Representação da altura topográfica.

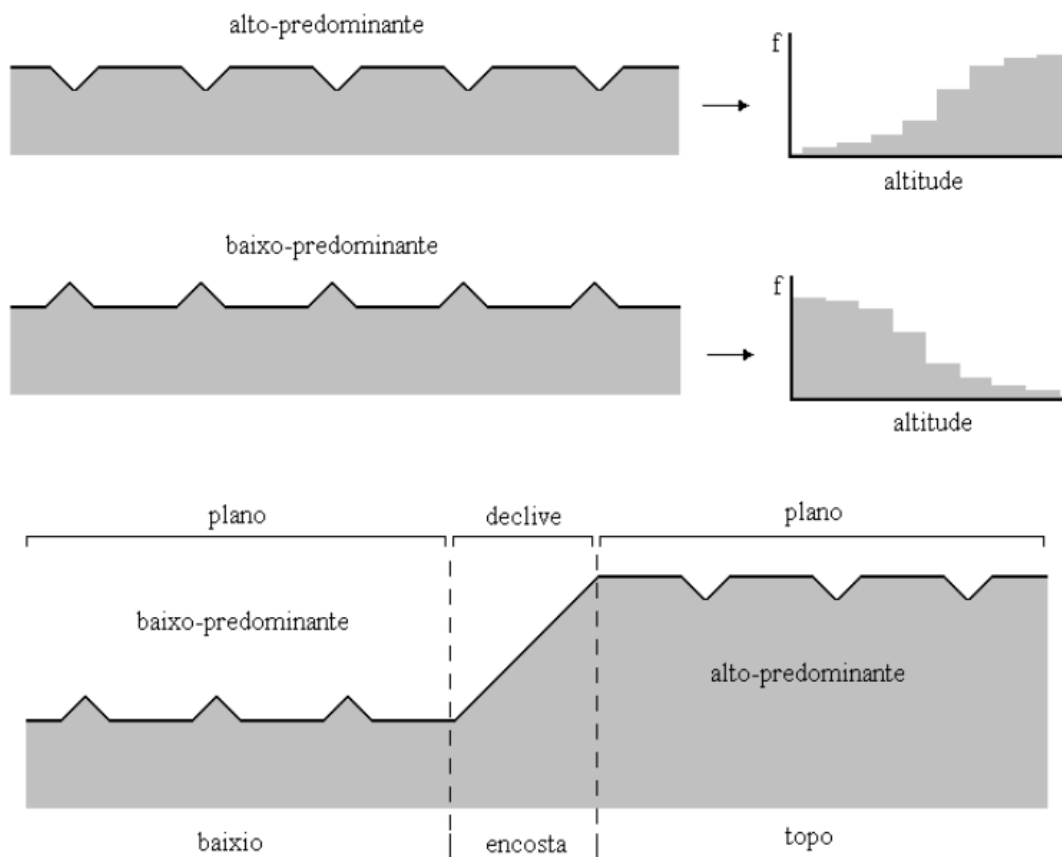


Fonte: Adaptado de Muñoz (2010).

A integral hipsométrica estima o grau de dissecação ou maturidade geológica de uma unidade de paisagem, geralmente bacia hidrográfica, por meio de valores numéricos (usualmente 0 a 1) (STRAHLER, 1952). Essa variável expressa a proporção de terras altas dentro de uma unidade de relevo, traduzindo seu grau de erosão (PIKE; WILSON, 1971). Valores baixos indicam bacias mais antigas e com menor quantidade de relevo disponível para erosão, ao passo que valores próximos de 1 representam terras altas com maior volume de terreno disponível (MUÑOZ, 2013).

A predominância do relevo é uma métrica que demonstra a prevalência das elevações relativas de uma unidade de relevo, que pode se caracterizar como baixo-predominante (baixa frequência dos valores mais altos) ou alto-predominante (baixa frequência dos valores mais baixos) (DENT; YOUNG, 1981). Em SIG, pode ser obtida por meio do balanço entre os desvios negativos e positivos em relação à mediatriz da altitude dentro de cada unidade de relevo (MUÑOZ; VALERIANO, 2008) (Figura 2.4).

Figura 2.4 – Caracterização da predominância do relevo.



Fonte: Muñoz e Valeriano (2008).

A rugosidade, também conhecida como textura do relevo, é muito utilizada para evidenciar frequência de topos de morros ou fundos de vale dentro de uma determinada área, caracterizando o caráter fino ou grosso do espaçamento entre as feições topográficas (IWAHASHI; PIKE 2007). Dentre diversas formas de se calcular, a rugosidade pode ser obtida baseando-se na razão entre uma área superficial (real) e uma área planar, e possui relação direta com a declividade (HOBSON, 1972).

A Tabela 2.1 sumariza as principais características das variáveis regionais exemplificadas aqui e suas respectivas equações.

Tabela 2.1 - Variáveis regionais descritas neste trabalho, suas principais características e equações.

Variável	Descrição	Equação
Altura topográfica (A)	Distância vertical entre um ponto localizado sobre a superfície e sua projeção no plano das altitudes mínimas.	$A = Z - Z_{min}$
Relevo relativo (R)	Diferença entre a elevação máxima e mínima dentro de uma determinada área de busca	$R = Z_{max} - Z_{min}$
Integral hipsométrica (Hi)	Estima o grau de dissecação de uma paisagem, ou seja, a taxa de área erodida e da área disponível para erosão	$Hi = \frac{(Z_{med} - Z_{min})}{(Z_{max} - Z_{min})}$
Predominância do relevo (P)	Indica a frequência de valores altos ou baixos de elevação	$P = Z_{med} - \left(\frac{Z_{max} + Z_{min}}{2}\right)$
Rugosidade (T)*	Evidencia frequência de topos de morros ou fundos de vale	$T_{seg} = \frac{\left(\sum \left(\frac{r^2}{\cos S_{nxy}}\right)\right)}{(ÁREA_{seg})}$

* A equação da rugosidade neste caso está definida para o cálculo em segmentos. S_{nxy} = declividade do pixel; $ÁREA_{seg}$ = área do segmento; r^2 = área do pixel.

Fonte: Produção do autor.

2.1.3 Unidades de mapeamento

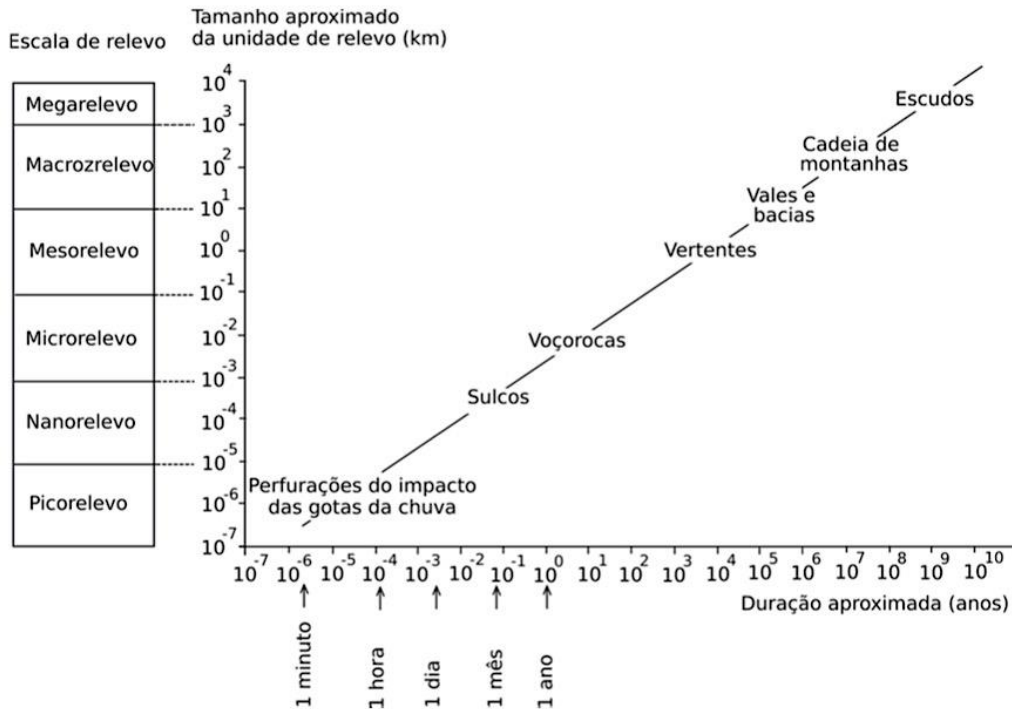
As propriedades geomorfométricas da topografia quanto às suas representações em formas de relevo são dependentes da escala espacial. Isto implica que o relevo é uma associação de formas organizadas numa hierarquia espacial (DIKAU, 1989).

Kugler (1974) estabeleceu uma hierarquia taxonômica de unidades de relevo com complexidade variada em diferentes escalas, baseando-se nas características geomorfométricas. A hierarquia de cada nível de relevo foi dada da seguinte forma: faceta, elementos, formas e padrões. Como exemplos de níveis hierárquicos, a faceta pode ser representada por declives (ou vertentes) ou orientação uniformes. Os elementos de relevo incluem áreas com curvatura vertical e horizontal homogêneas, podendo ter variações na declividade. As formas de relevo são unidades maiores e apresentam morfologia herdada por processos morfogenéticos particulares. Como exemplos, pode-se citar deltas, escarpas, dolinas, vales, leques aluviais e bacias hidrográficas. A associação de formas de relevo define os padrões de relevo, quando possui um determinado padrão, caracterizado por propriedades geomorfométricas em comum. Como exemplos, têm-se planícies, tabuleiros, chapadas, escudos, etc.

Essa abordagem permite a análise de formas de relevo por sucessivas desagregações de unidades complexas em elementos mais simples, e uma síntese de objetos por integração e combinação de simples componentes de forma de relevo em unidades mais complexas.

As unidades de relevo também podem ser hierarquizadas no tempo e espaço, sendo que unidades maiores são mais antigas que unidades menores. O espaço define escalas de relevo que variam de picorrelevo, com extensão de 0,1 mm a 1 cm, a megarrelevo, acima de 1.000 km de extensão. Logo, a extensão é diretamente proporcional ao tempo. Pequenas crateras de gotas de chuvas, correspondentes ao picorrelevo, levam frações de segundos para se formar, enquanto escudos pré-cambrianos se formam ao longo de bilhões de anos, caracterizando megarrelevos (Figura 2.5) (DIKAU, 1989).

Figura 2.5 - Relação espaço-temporal de algumas unidades de relevo.



Fonte: Dikau (1989).

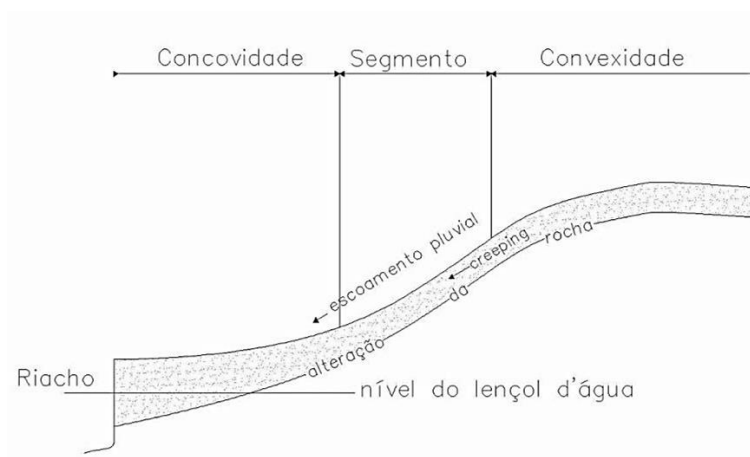
Dentro da mesoescala, as vertentes podem se caracterizar como unidades de mapeamento úteis à partição do terreno para agrupamento e classificação das feições topográficas. Em seu sentido amplo, vertente significa superfície inclinada, não horizontal, sem apresentar qualquer conotação genética ou locacional. É formada por ampla variedade de condições internas e externas, destacando-se a origem endogenética (vulcanismos, epirogênese, orogenia, etc) e a exogenética (meteorização, movimentos de massa, ablação, deposição, etc) (CHRISTOFOLETTI, 1974).

Em termos mais específicos, a vertente é uma forma tridimensional que foi modelada pelos processos de denudação, atuantes ao longo do tempo, e representa a conexão dinâmica entre o interflúvio (cumeeira) e o fundo do vale (talvegue) (JAN DYLIK, 1968). Seu limite inferior possui um valor de orientação que acaba quando os processos que determinam a natureza da vertente deixam de atuar. A presença de discontinuidades naturais, tais como falhas geológicas (ou escarpas), terraços, pedimentos e falésias, condicionam alterações bruscas e devem ser consideradas na delimitação da porção inferior da vertente. Nem sempre tão simples de determinar, o limite superior deve indicar

a extensão mais distante e mais alta da superfície inclinada, de onde provém um transporte contínuo de sedimentos para a base da vertente, majoritariamente identificado como a linha divisora de águas.

Derruau (1966) definiu uma terminologia para descrever os componentes da vertente. Dentre esses termos, destaca-se o segmento, que se refere à porção do perfil da vertente na qual os ângulos são aproximadamente constantes, dando-lhe um caráter retilíneo (Figura 2.6).

Figura 2.6 – Perfil típico de vertente, com convexidade no topo e concavidade na base, sendo ambas separadas por um ponto simples de inflexão ou segmento.



Fonte: Derruau (1966).

2.2 Análises e recursos

2.2.1 MDEs

MDEs são representações digitais do relevo. Os valores de elevação são arranjados em grades de linhas e colunas espaçadas (matrizes), sendo sua localização referenciada por sistemas de coordenadas geográficas ou projetadas (USGS, 2019). O arranjo matricial desses dados permite a sua manipulação computacional, seja por técnicas de sensoriamento remoto ou geoprocessamento. A difusão desse modelo deu-se com o

advento de grandes missões orbitais no final da década de 90 e início dos anos 2000, quando grandes extensões da superfície terrestre puderam ser cobertas.

Os modelos de altitude podem ser gerados a partir de sensores ópticos, radares de abertura sintética (SAR) e *light detection and range* (LiDAR). Os sensores ópticos geram MDEs por técnicas de estereoscopia, tendo como exemplos os modelos Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) - Global Digital Elevation Model (GDEM) e Satellite Pour l'Observation de la Terre (SPOT). Os modelos de radares de abertura sintética (SAR) são produzidos na faixa de micro-ondas, através de técnicas de interferometria, clinometria ou polarimetria. Como exemplos, têm-se o SRTM, *TerraSAR-X add-on for Digital Elevation Measurement* (TanDEM) e *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS PALSAR) (RABUS et al., 2003; TOUTIN; GRAY, 2000; TACHIKAWA, 2011). A tecnologia LiDAR utiliza pulsos de laser direcionados ao solo, a partir de aeronaves, para produzir MDEs de resolução fina, os quais são necessários para projetos de modelagem hidrodinâmica, construções, desenvolvimento urbano, entre outras finalidades (DONG; CHEN, 2017).

Dentre os principais MDEs disponíveis, destaca-se o MDE-SRTM que causou grande impacto mundial devido à extensa cobertura superficial, disponibilização gratuita e bom desempenho. O SAR interferométrico da SRTM foi usado para levantamento topográfico de 99,7% da superfície terrestre entre 60°N e 56°S, coletando informações nas bandas C ($\lambda \sim 5$ cm), com resolução espacial de 3 arco-segundos (~ 90 m), ao longo de 11 dias de missão (JPL, 2019). O seu desempenho para a América do Sul teve erros absolutos de localização de 9 m (em 90% dos dados) e de altitude de 6,2 m, além de erro relativo da altitude de 5,5 m (FARR et al., 2007).

A padronização das condições de aquisição dos dados de MDE com o advento do sensoriamento remoto, permitiu o desenvolvimento de um banco de dados geomorfométricos unificado, de cobertura nacional, denominado Topodata (Brasil, 2008). Este consistiu no refinamento dos dados SRTM, então disponíveis em 3", e suas derivações geomorfométricas locais básicas, elevação, declividade, orientação de vertentes, curvatura horizontal e vertical e forma de terreno (VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010). Este conjunto de variáveis geomorfométricas locais está

disponível gratuitamente em um banco de dados online (<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>).

2.2.2 Recursos e métodos para geração de unidades de mapeamento

O mapeamento geomorfológico envolve o conceito de agrupamento de atributos topográficos por similaridade, e classificação em determinados padrões, baseando-se em variáveis geomorfométricas e estatísticas obtidas a partir dos valores de MDEs (EVANS, 1972; MACMILLAN ET AL., 2004; OLAYA, 2009). Esses atributos topográficos podem ser calculados usando-se uma abordagem pixel a pixel (*cell by cell*), onde as células são tratadas individualmente e, portanto, independente das demais (MOORE et al., 1991; WILSON; GALLANT, 2000). Isso gera uma dificuldade de reconhecimento de atributos que descrevem compartimentações topográficas mais complexas ou padrões de relevo, devido à falta de contexto. A maior parte dos atributos é derivada localmente e varia, relativamente, de acordo com o tamanho do filtro utilizado no cálculo (MACMILLAN et al., 2004).

Alguns autores sugerem que o problema possa ser resolvido através de uma abordagem multi-escala, onde atributos calculados em diferentes escalas são combinados (WOOD, 1996; GALLANT; DOWLING, 2003; SCHMIDT; ANDREW, 2005), ou ainda por regionalização das variáveis locais (SHARY et al., 2002). No entanto, esta generalização de variáveis geomorfométricas locais para uma informação regional está diretamente relacionada com o grau de detalhamento da informação e requer transformações adequadas dos dados originais, sempre observando a escala (VALERIANO; ROSSETTI, 2017).

Uma abordagem de interesse tem sido a discretização do terreno em objetos por técnicas de segmentação que avaliam semelhanças e proximidades entre valores de pixel. Neste processo, conhecido como segmentação, o agrupamento de pixels contíguos, a partir de um determinado critério de homogeneidade, resulta em unidades de terreno (STROBL, 2008).

Com a adoção de MDEs e das plataformas SIGs, a classificação automática de relevo obteve um grande impulso (PRIMA et al., 2006; IWAHASHI; PIKE, 2007; TAGIL; JENESS, 2008; DRAGUT; EISANK, 2012). Nesse sentido, um dos métodos mais utilizados é a análise de agrupamentos (*clusters*) (classificação não supervisionada), onde as células são agrupadas com base nos critérios de similaridade, ou seja, na separação no espaço de atributos. Esses algoritmos de agrupamento minimizam diferenças intraclasses e maximizam as interclasses. No entanto, essa abordagem possui vários aspectos problemáticos relacionados à escolha subjetiva dos procedimentos: parâmetros de entrada, métodos de agrupamento e interpretação dos resultados (MINAR; EVANS, 2008).

A análise de agrupamentos permite o uso de uma grande variedade de parâmetros de entrada, o qual pode resultar em valores mais sintéticos. No entanto, o aumento no número de parâmetros pode dificultar a interpretação geomorfológica de elementos de relevo, bem como mascarar a relação com solos e uso do solo (MINAR; EVANS, 2008).

Uma solução a este problema pode ser encontrada na definição de unidades geomórficas. Como visto anteriormente, a taxonomia geomorfológica classifica o relevo em unidades geomórficas hierárquicas, tendo como a unidade mais simples e menor o elemento de relevo (encostas, canais, escarpas, cristas de morro), seguido por um aumento de complexidade pelas formas de relevo (leques aluviais, dunas eólicas, drumlins, unidades geológicas, etc). A identificação dessas unidades é um dos principais objetivos da segmentação de terreno. A simplicidade geométrica delas facilita o reconhecimento como unidades fundamentais dentro de um sistema de segmentação de terreno (MINAR; EVANS, 2008). A Tabela 2.2 mostra exemplos de trabalhos que utilizaram elementos do relevo associados ao mapeamento.

Tabela 2.2 – Exemplos de elementos de terreno, em ordem de escala e extensão.

Referência	Tipo	Método*	Escala resolução	Área (km ²)	Local	Fonte MDE
Gallant e Dowling (2003)	fundo de vale	Z, S	25.000 25 m	4	Illalong e Rio Kyeamba Austrália	mapa
Williams et al. (2000)	fundo de vale	altura da drenagem	100.000 30 m	150	Vale Pahsimeroi USA	NED USGS
Miliaresis e Iliopoulou (2004)	montanha	segmentos de S	1.000.000 1 km	368.673	Zagros Range Iran	<i>Global DEM</i>
Valeriano e Rossetti (2017)	pacote sedimentar	segmentos de Z	2.000.000 90 m	1.500.000	Amazônia Central	SRTM

(*) Z – altitude; S – declividade; TWI – índice de saturação; SPI - índice de enxurrada; TPI – Índice de posição topográfica; Tx – textura; K – curvatura; SD – desvio padrão (da altitude).

Fonte: Produção do autor.

A morfometria e a estatística conhecida das unidades geomórficas, chamadas de assinatura geométrica (PIKE, 1988), podem levar à identificação de outras unidades de relevo (EVANS, 1972).

Um dos métodos mais utilizados para a segmentação de terreno é o baseado em crescimento de regiões. A partir da análise digital da imagem, constroem-se objetos pela fusão adjacente de células iterativamente com características topográficas similares, até um certo critério ser atingido (ROMSTAD, 2001; DRAGUT; BLASCHKE, 2006). Esse critério, definido pelo usuário, controla o tamanho dos objetos resultantes, e é entendido como o máximo de heterogeneidade permitida entre objetos individuais. Objetos são

definidos mais por suas propriedades internas, do que pelas bordas que os separam. Adicionalmente, as bordas dos objetos tendem a respeitar linhas de quebras topográficas, pois nestas ocorrem contrastes acima dos critérios de homogeneidade (ROMSTAD et al., 2012).

O algoritmo de segmentação multirresolução (BAATZ; SCHÄPE, 2000) é um dos mais usados para estudos de ciências da terra (BLASCHKE, 2010). Este segmentador é baseado em crescimento de regiões e emprega uma metodologia do tipo *bottom-up* (BENZ et al., 2004). O resultado da segmentação depende das características dos dados, como resolução espacial, número de bandas e quantização da imagem (STUMPF; KERLE, 2011). O algoritmo disponível no aplicativo *eCognition* (ECOGNITION DEVELOPER, 2011) possui um grau de tolerância, chamado de escala, o qual é definido como o limiar de heterogeneidade permitido para a informação de entrada. É importante salientar, no entanto, que diferentes aspectos geomorfológicos possuem conjuntos diferentes de parâmetros de segmentação ideais (ANDERS et al. 2011).

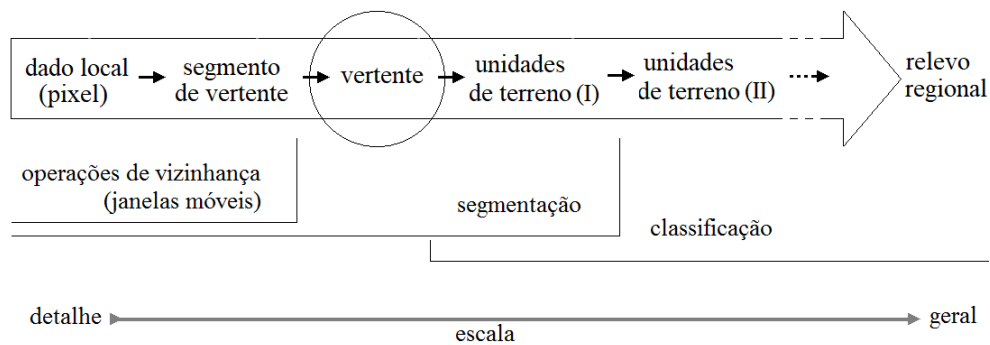
2.2.3 Caracterização das unidades

A extração de feições elementares (MINAR; EVANS, 2008) para a construção de unidades de terreno permite o emprego de métodos específicos. Uma das formas para tal procedimento refere-se ao processo de generalização da informação local. Na regionalização, o conjunto de valores correspondente à identificação (*ID* em SIG) de cada unidade de mapeamento é integrado a um único valor, calculado a partir da distribuição da variável (*e.g.*, média, máximo, mínimo) naquela unidade. Transformações dos dados originais podem ser necessárias para adequar seu significado à expressão regional, como o uso de valores absolutos de curvatura (convexos ou côncavos indistintos) (VALERIANO; ROSSETTI, 2017). Procedimentos de degradação e generalização da informação derivada de um MDE são, muitas vezes, necessários em mapeamento regionais (HENGL, 2006).

No caso de terrenos dissecados a montanhosos, pode-se situar a vertente como unidade apropriada para o primeiro nível de regionalização. As derivações locais, obtidas por operações de vizinhança, englobam somente segmentos de vertentes (DENT; YOUNG, 1981), definidos pela extensão da janela móvel utilizada. Nesta escala, são reconhecidas

condições locais (solos, hidrologia), ordenadas em topossequências ou catenas, e relacionadas a variações de geomorfometria entre os segmentos do perfil (CHRISTOFOLETTI, 1980; GERRARD, 1981). Feita a delimitação das vertentes, pode-se utilizar técnicas de reagrupamento por classificação em unidades de terreno (MEIJERINK, 1988), aplicadas sucessivamente em níveis hierárquicos (I, II, e assim por diante) crescentes (Figura 2.7).

Figura 2.7 – Desenvolvimento de unidades de terreno em progressão hierárquica com a vertente como feição elementar, desde dados locais do MDE até a escala de relevo regional, associado às abordagens de processamento consideradas para cada nível.



Fonte: Produção do autor.

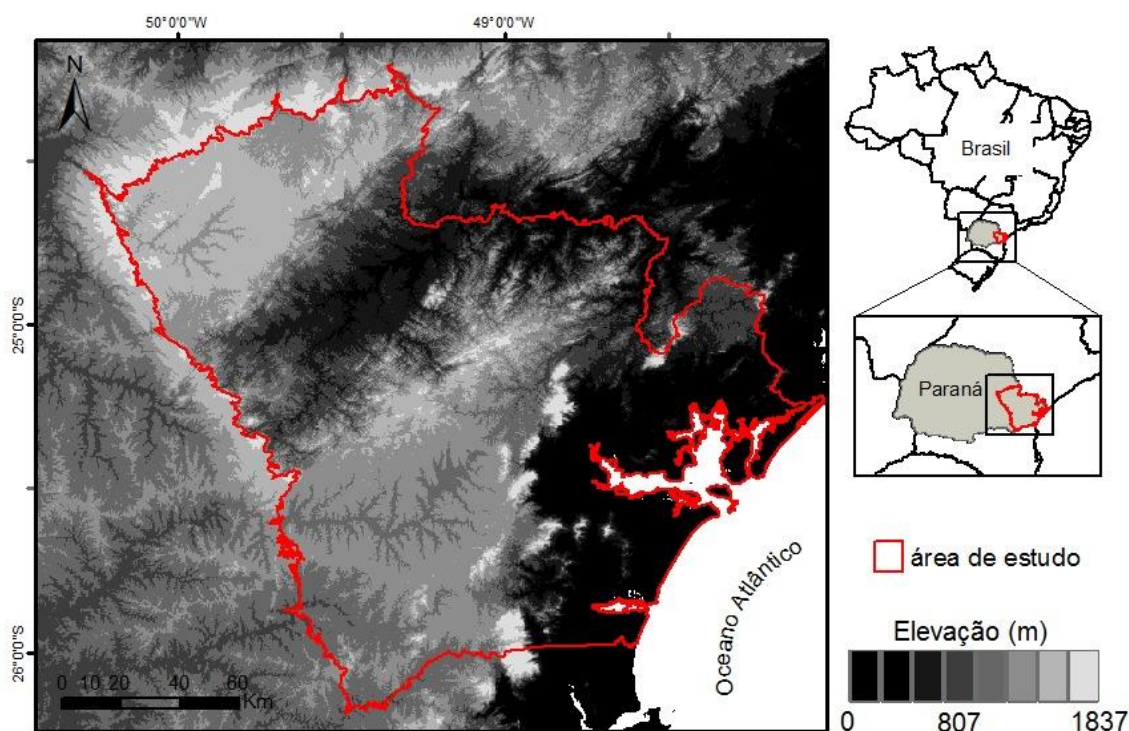
Por exemplo, o delineamento de montanhas individuais da cadeia Zagros, no Irã, foi obtido com a segmentação da declividade (MILIAREISIS; ILIOPOULOU, 2004). As montanhas foram posteriormente classificadas em unidades de maior nível hierárquico, de acordo com outras características geomorfológicas ligadas a processos de soergimento. Em contraste, no relevo sedimentar da Amazônia Central (VALERIANO; ROSSETTI, 2017), a segmentação da elevação separou depósitos sedimentares com pequenos desníveis entre si, com realce de feições antes obscurecidas pelas variações locais da elevação. A caracterização geomorfológica desses segmentos, associada à intensidade de dissecação, mostrou-se estruturada em regiões de contextos geológicos distintos. Esses autores combinaram diversas operações de generalização (filtragens, simplificação dos dados e classificações) com as unidades de mapeamento, realizando o agrupamento dos segmentos em unidades adequadas às feições de interesse locais (terraços aluviais), seguido por reagrupamento para contemplar feições regionais (interflúvio do planalto sedimentar).

3 ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização

A área de estudo, com cerca de 24.146,090 km², engloba o embasamento cristalino paranaense, parte da Bacia do Paraná, e algumas unidades sedimentares do final do Neoproterozoico, expostos na parte leste do Estado do Paraná, sul do Brasil (IBGE, 2014) (Figura 3.1). Essa área foi escolhida pelo relevo montanhoso a ondulado, altamente dissecado, característico de terrenos cristalinos, que favorecem a sua configuração em vertentes. O escudo cristalino, denominado de Escudo do Paraná, é constituído pelas rochas mais antigas do estado (arqueanas a proterozoicas), e sua área de exposição abrange toda a Planície Litorânea e o Primeiro Planalto Paranaense. O escudo é parcialmente recoberto por sedimentos recentes e por rochas sedimentares paleozoicas, e possui intrusões de rochas básicas mesozoicas (SANTOS et al., 2006).

Figura 3.1 – Localização e hipsometria geral da área de estudo (vermelha).



Fonte: Produção do autor.

3.2 Geologia

A gênese do embasamento cristalino vincula-se a vários ciclos geotectônicos acompanhados de sedimentação, metamorfismo regional, falhamentos, dobramentos e extensas intrusões. O escudo é formado por rochas ígneas e metamórficas, formadas do Arqueano (2,6 Ga) ao Paleozoico Inferior (450 Ma). Essas rochas são localmente cobertas por seqüências vulcano-sedimentares e sedimentares (neoproterozoicas a paleozoicas), e sedimentos inconsolidados (cenozoicos) (SANTOS et al., 2006).

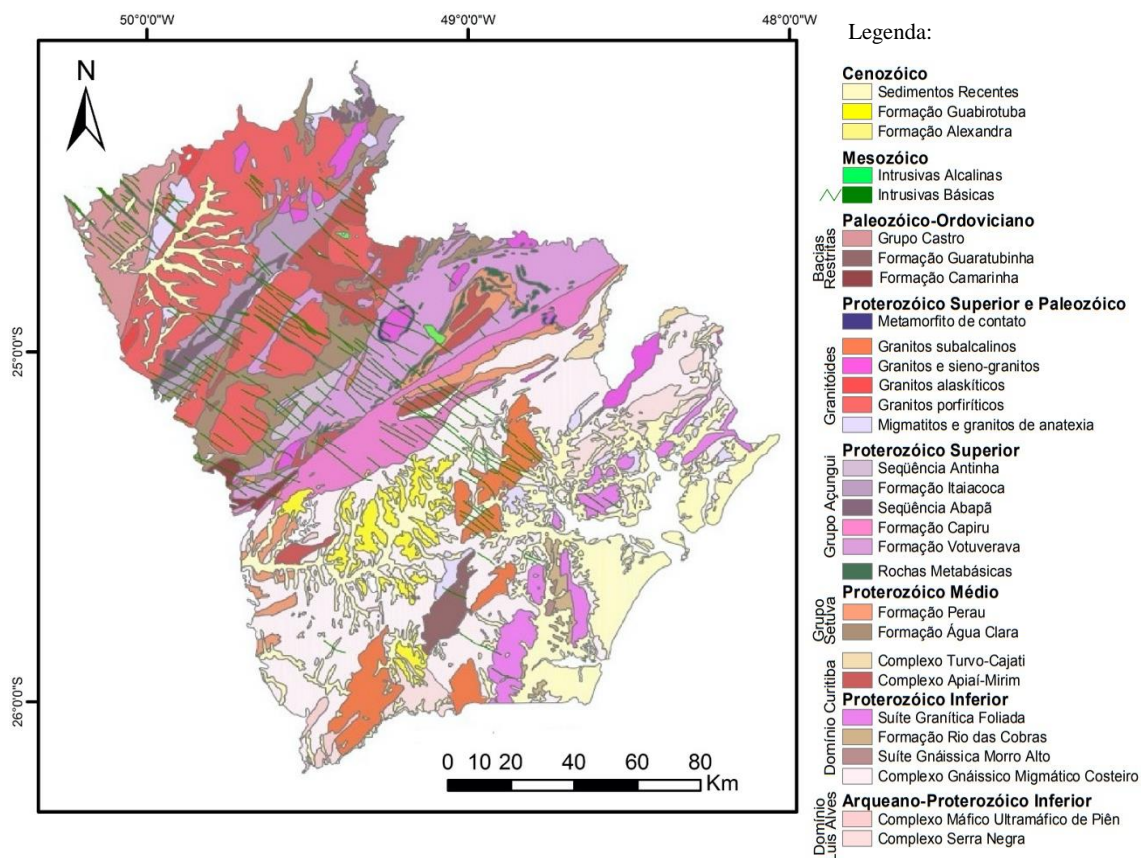
As rochas mais antigas (Arqueano ao Proterozoico Superior) de alto grau metamórfico afloram na porção sudeste, próximo ao litoral, enquanto as rochas de baixo grau metamórfico situam-se na porção noroeste. No final do Proterozoico e início do Paleozóico (Cambriano), manifestações magmáticas originaram as rochas granitoides, constituindo o Cinturão Granitoide Costeiro, (BASEI et al. 1992), que atinge altitudes de 1.500 a 1.889 m. Este é representado por 42 corpos que variam entre granitos mais ou menos foliados, granito-gnaisses, migmatitos e outras rochas foliadas. A natureza petrográfica e estrutural desses granitoides, frequentemente isótipos, os tornam resistentes à erosão (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998). No Mesozoico, ocorreram intrusões de rochas carbonatíticas, alcalinas e básicas.

A Figura 3.2 apresenta o mapa geológico do Escudo do Paraná (MINEROPAR, 1986), com as suas grandes unidades litoestratigráficas, que são conjuntos de rochas de mesma origem e idade. O bloco mais a leste, de cores mais claras, é formado principalmente por rochas metamórficas de alto grau metamórfico e intrusões granitoides de composição variada. Ele é dividido em dois grandes domínios tectônicos, denominados Luís Alves e Curitiba. O domínio Luís Alves engloba as rochas mais antigas do sul do Brasil, principalmente metabásicas, metaultrabásicas, granulitos, charnockitos e outras de alto grau metamórfico, bem como os seus produtos de retrabalhamento tectônico (cataclasitos de um modo geral) e metamórfico (principalmente xistos de baixo grau). O domínio Curitiba compreende uma associação de gnaisses, migmatitos, granitos e rochas resultantes do metamorfismo posterior, de grau mais baixo do que o de origem. Ocorrem, ainda, neste bloco as intrusões granitoides da Serra do Mar, cujas manifestações vulcânicas são representadas por riolitos e andesitos da Formação Guaratubinha.

O bloco situado a oeste, representado em cores mais escuras no mapa, é formado essencialmente por rochas metamórficas de baixo grau, representadas pelos grupos Setuva e Açungui (filitos, mármore, quartzitos, entre outras), além de intrusões granitoides de dimensões mais regionais do que as do bloco anterior. Outra característica evidente deste bloco é a estruturação em dobras mapeáveis na escala regional, como as que ocorrem ao longo da zona de contato entre os dois blocos. A sinuosidade deste contato reproduz, no mapa, as grandes dobras da Formação Capiru sobre as rochas do Complexo Gnáissico Migmático Costeiro.

Na região de Curitiba, ocorre extensa rede de depósitos sedimentares do Cenozoico, preservados ao longo da bacia do Alto Rio Iguaçu e afluentes, sob o nome de Formação Guabirota.

Figura 3.2 – Mapa geológico da área de estudo.



Fonte: Adaptado de Mineropar (1986).

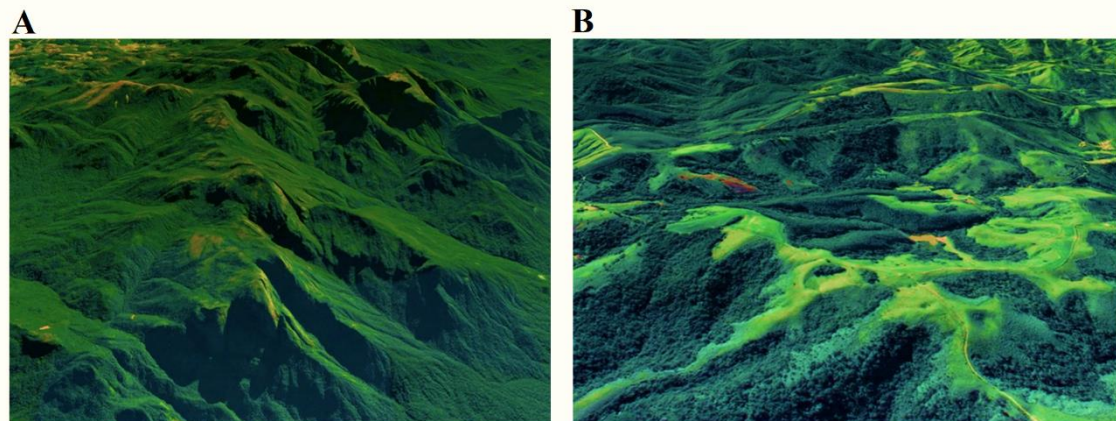
A intrusão de rochas básicas que ocorreu ao longo de fraturas distensivas durante o Mesozoico está relacionada à evolução estrutural da Bacia do Paraná. Os diques são de diabásio e diorito, sendo notável o enxame deles na faixa central do Primeiro Planalto, com direção geral NW-SE, associados à estrutura denominada Arco de Ponta Grossa. Vinculados a essa fase, ocorrem rochas alcalinas e carbonatitos, representados por dezenas de corpos, a maioria deles constituídos por pequenos diques e *plugs* (BASEI et al., 1992).

3.3 Geomorfologia

O relevo do Paraná é compartimentado em morfoestruturas e morfoesculturas. Segundo Ross (1992), morfoestruturas correspondem a grandes estruturas, de dimensões quilométricas, que são agrupadas por similaridades de acordo com seu contexto

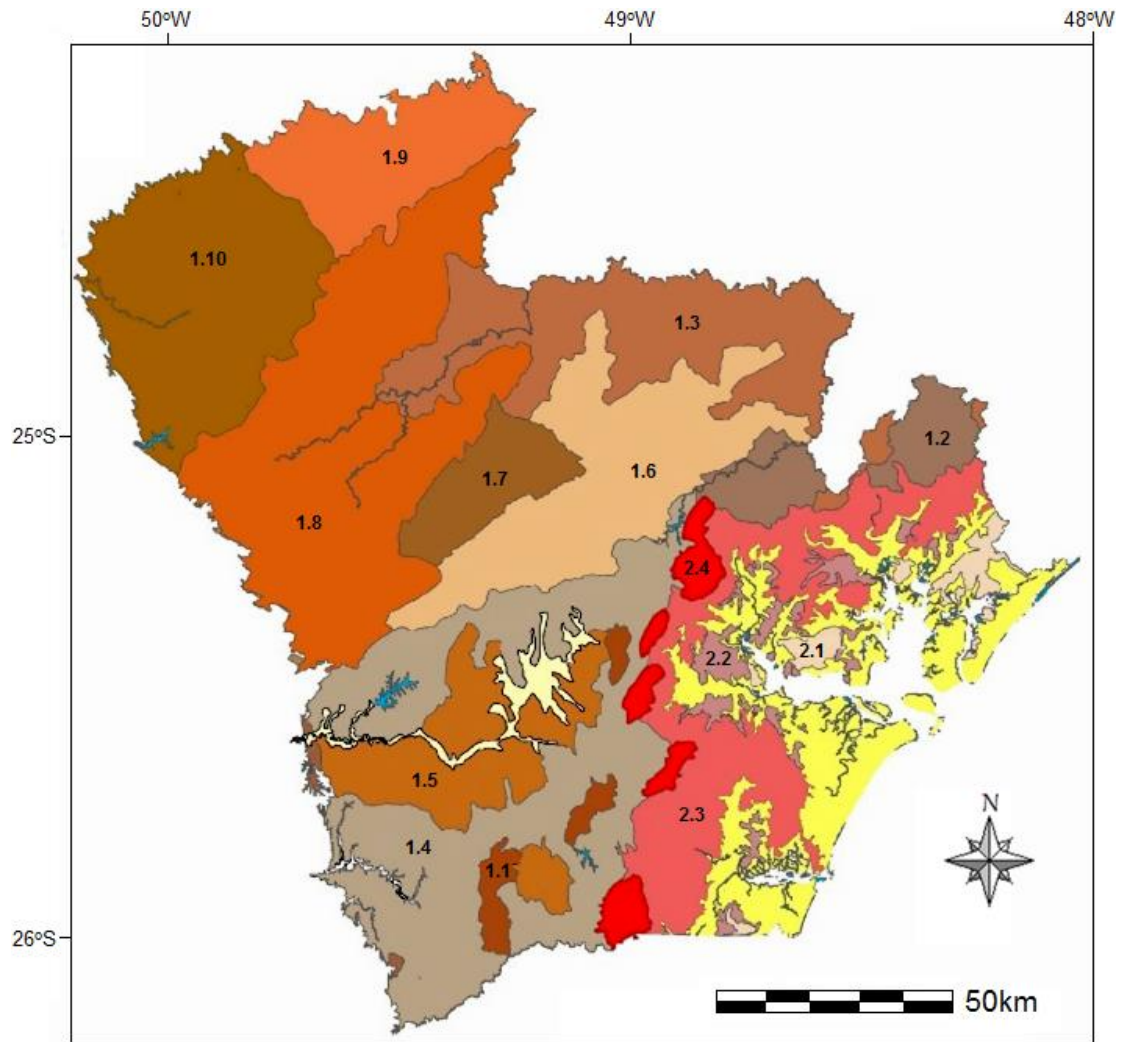
geológico, como por exemplo, as bacias sedimentares. Dentro das morfoestruturas há as morfoesculturas, que correspondem às formas resultantes de intemperismo, como planaltos, depressões e chapadas. O Escudo do Paraná encontra-se dentro do Cinturão Orogênico do Atlântico, uma morfoestrutura de natureza poliorogênica, uma das mais extensas do Brasil. Dentro do escudo ocorrem duas morfoesculturas, representadas pela Serra do Mar e Morros Isolados (Figura 3.3A) e o Primeiro Planalto Paranaense (Figura 3.3B) (SANTOS et al., 2006). A Figura 3.4 ilustra a compartimentação geomorfológica do Escudo do Paraná na escala 1:650.000.

Figura 3.3 – Exemplos de morfoesculturas: A) Serra do Mar e Morros Isolados e B) Primeiro Planalto Paranaense (Planalto Dissecado do Alto Ribeira).



Fonte: Google Earth (2020).

Figura 3.4 – Mapa geomorfológico da área de estudo.



CINTURÃO OROGÊNICO DO ATLÂNTICO

1 PRIMEIRO PLANALTO PARANAENSE
Sub-unidades morfoesculturais:

- 1.1** Blocos Soerguidos do Primeiro Planalto
- 1.2** Planalto do Complexo Gnáissico-Migmatítico
- 1.3** Planalto Dissecado de Adrianópolis
- 1.4** Planalto de Curitiba
- 1.5** Planalto de Alto Iguaçu
- 1.6** Planalto Dissecado de Tunas do Paraná
- 1.7** Planalto Dissecado de Rio Branco do Sul
- 1.8** Planalto Dissecado do Alto Ribeira
- 1.9** Planalto do Alto Jaguariaiva
- 1.10** Planalto de Castro

2 SERRA DO MAR
Sub-unidades morfoesculturais:

- 2.1** Morros Isolados Costeiros
- 2.2** Rampas de Pré-Serra e Serras Isoladas
- 2.3** Serra do Mar Paranaense
- 2.4** Blocos Soerguidos da Serra do Mar

BACIAS SEDIMENTARES CENOZOICAS E DEPRESSÕES TECTÔNICAS

PLANÍCIES

Sub-unidades morfoesculturais:

- Planícies Litorânea e Flúvio-Marinhas
- Planícies Fluviais
- Corpos d'água

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2006).

Em relação às sub-unidades morfoesculturais, boa parte da dissecação varia de alta a muito alta. Nas regiões do Planalto de Curitiba e de Castro ocorre dissecação média, enquanto os Blocos Soerguidos do Primeiro Planalto possuem dissecação muito alta. Em geral, os topos de morro são alongados e em cristas. As porções que possuem cobertura sedimentar, como o Planalto de Curitiba e o Planalto do Alto Iguaçu, costumam apresentar topos mais aplainados. As vertentes são, em grande parte, convexas e retilíneas, com vales em V fechados ou encaixados. As classes de declividade com valores maiores que 47% ocorrem, em sua maioria, na Serra do Mar (230,96 km²) e no Planalto Dissecado de Adrianópolis (301,43 km²). As porções com declividade menor que 6% ocorrem em grande extensão no Planalto de Curitiba (2.299,71 km²), no Planalto de Castro (1615, 67 km²) e no Planalto Dissecado do Alto Ribeira (1495 km²). Os maiores gradientes de elevação estão associados às regiões de maior declividade e, por conseguinte, à maior dissecação, isto é, nos Blocos Soerguidos da Serra do Mar (1360 m), na Serra do Mar Paranaense (1320 m), no Planalto Dissecado de Adrianópolis (1300 m), e no Planalto Dissecado Tunas do Paraná (1120 m). A Tabela 3.1 sumariza as principais características geomorfológicas das sub-unidades morfoesculturais do escudo cristalino (SANTOS et al., 2006).

Tabela 3.1 – Principais características geomorfológicas da área de estudo.

UNIDADE MORFOESCULTURAL	SUB-UNIDADE MORFOESCULTURAL	Dissecação	FORMAS DE RELEVO Morfologia dominante			ALTITUDE (metros acima do nível do mar)			DECLIVIDADE (áreas em km ²)	
			Topos*	Vertentes	Vales	Min	Max	Gradiente	< 6%	> 47
Serra do Mar	1.1.1 Morros Isolados Costeiros	muito alta	A, C	retilíneas	V fechados	20	920	900	46,18	31,11
	1.1.2 Rampas de Pré-Serra e Serras Isoladas	alta	A, C e R	retilíneas	V fechados	200	600	400	269,84	1,01
	1.1.3 Serra do Mar Paranaense	alta	A, C	retilíneas	V encaixados	20	1340	1320	288,14	250,96
	1.1.4 Blocos Soerguidos da Serra do Mar	muito alta	A, C	retilíneas	V fechados	320	1680	1360	61,84	87,7
Primeiro Planalto Paranaense	1.2.1 Blocos Soerguidos do Primeiro Planalto Paranaense	muito alta	A, C	retilíneas	V fechados	820	1320	500	85,22	5,76
	1.2.2 Planalto do Complexo Gnáissico-Migmatítico	alta	A	convexas	V aberto	300	1040	740	413,19	9,15
	1.2.3 Planalto Dissecado de Adrianópolis	alta	A, C	retilíneas	V encaixado	100	1400	1300	875,12	301,43
	1.2.4 Planalto de Curitiba	média	A, Ap	convexas	V	560	1240	680	2299,71	2,57
	1.2.5 Planalto do Alto Iguaçu	baixa	A, Ap	convexas	V aberto	860	1000	140	1096,6	0
	1.2.6 Planalto Dissecado de Tunas do Paraná	alta	A, C	retilíneas	V encaixado	280	1400	1120	824,19	62,12
	1.2.7 Planalto Dissecado de Rio Branco do Sul	alta	A	convexas	V	400	1180	780	206,7	36,93
	1.2.8 Planalto Dissecado do Alto Ribeira	alta	A, C	retilíneas e côncavas	V encaixado	320	1200	880	1495,17	46,97
	1.2.9 Planalto do Alto Jaguariaíva	alta	A	convexas	V	780	1300	520	606,82	9,91
	1.2.10 Planalto de Castro	média	A, Ap	convexas-côncavas	Aberto de fundo chato	920	1320	400	1615,67	4,19

*Topos: A = alongados, C = em cristas, R = rampas dissecadas, Ap = aplainados

Fonte: Adaptado de Santos et al. (2006).

4 MATERIAL E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os dados e recursos utilizados para o desenvolvimento do projeto, bem como explicita a metodologia adotada para a geração das unidades de mapeamento e sua funcionalidade.

4.1 Dados

A seguir encontra-se a lista resumida dos dados e principais materiais cartográficos utilizados:

- a) Dados geomorfométricos derivados do MDE SRTM e disponibilizados pelo projeto Topodata (BRASIL, 2008) (<http://www.webmapit.com.br/inpe/topodata/>);
- b) Mapa geomorfológico em escala 1:650.000, disponibilizado pelo Instituto de Terras, Cartografia e Geologia do Paraná em formato vetorial (<http://www.itcg.pr.gov.br/modules/faq/category.php?categoryid=9#>);
- c) Mapa geológico em escala 1:650.000, disponibilizado pela Minerais do Paraná-MINEROPAR, em formato vetorial (<http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/28onteúdo/28onteúdo.php?conteudo=106>).

Os dados utilizados como base para o processamento foram retirados do Topodata (BRASIL, 2008) e incluem as variáveis: altitude, declividade, orientação de vertentes, curvatura vertical e plano de divisores e talwegues. A área de estudo compreende as folhas SG-22-X-A, SG-22-X-B, SG-22-X-C, SG-22-X-D, SG-22-Z-A e SG-22-Z-B do sistema cartográfico brasileiro, que correspondem respectivamente aos arquivos Topodata de prefixo 24S51, 24S495, 25S51, 25S495, 26S51 e 26S495. Os dados de cada variável foram estruturados em planos de informação formados pela concatenação de seus respectivos arquivos.

Os dados de geomorfologia e geologia foram obtidos a partir de mapas elaborados pela MINEROPAR, em convênio com o Departamento de Geografia da Universidade Federal do Paraná. Os procedimentos metodológicos do mapeamento geomorfológico foram baseados no conceito de morfoestrutura e morfoescultura, definidos a partir dos trabalhos

de classificação e taxonomia do relevo de Ross (1992) e Ross & Moroz (1996). Cartas topográficas digitais do Paraná (formato vetorial; escala 1:250.000) da Diretoria de Serviço Geográfico (DSG), MDE SRTM e cartas geológicas foram usados como suporte para a execução do mapeamento (SANTOS et al., 2006). O mapeamento geológico foi realizado a partir da compilação de cartas geológicas do Paraná, oriundas de diversos projetos (MINEROPAR, 2006).

4.2 Recursos

A seguir encontra-se uma lista dos principais aplicativos utilizados e suas funções:

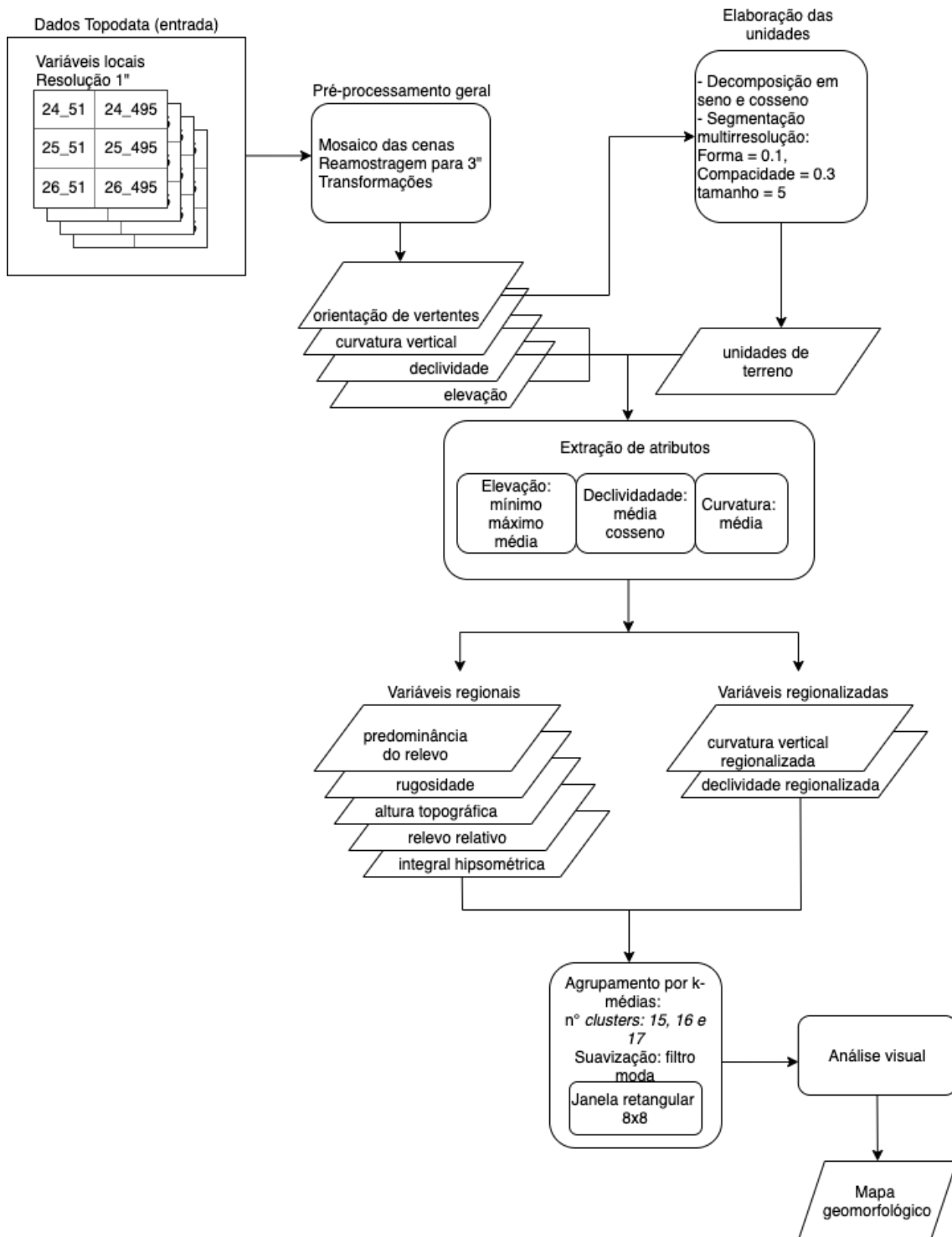
- a) *ArcGis* 10.6.1 (ESRI, 2018), para o geoprocessamento dos dados, análises e interpretações.
- b) *eCognition* 9.0 (TRIMBLE, 2014), para a segmentação e classificação das unidades de terreno;
- c) *Qgis* 2.18 (QGIS, 2018), para análise de agrupamento;
- d) *Google Earth* (GOOGLE, 2020), para análises visuais e captura de figuras.

4.3 Metodologias

A metodologia utilizada pode ser dividida nas seguintes grandes etapas: pré-processamento geral, elaboração de unidades de mapeamento, caracterização de unidades, testes e aplicações.

A Figura 4.1 exemplifica o fluxo de trabalho e as etapas metodológicas, incluindo a fonte de dados.

Figura 4.1 - Fluxograma da metodologia para a criação e avaliação das unidades de terreno.



Fonte: Produção do autor

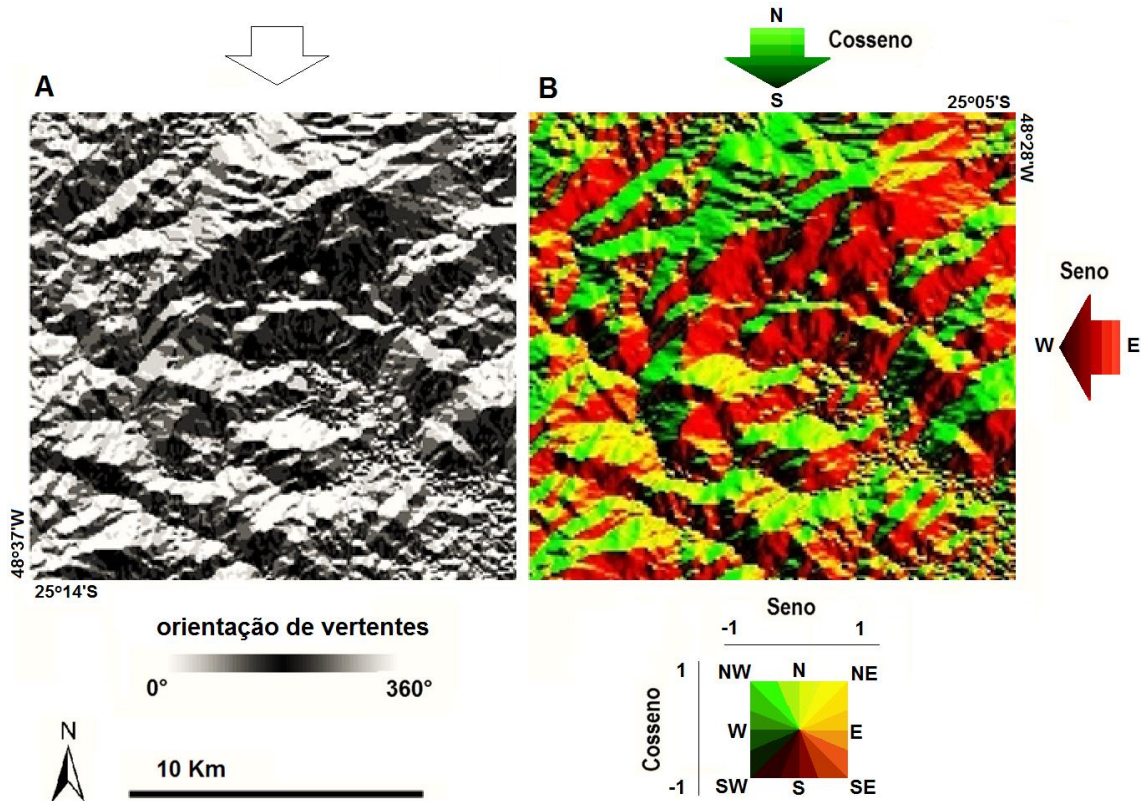
4.3.1 Pré-processamento geral

O pré-processamento geral consistiu na preparação dos dados extraídos do Topodata. Primeiramente, criou-se um mosaico das folhas cartográficas de cada variável. A resolução espacial de 1 arco-segundo (~30m) de cada mosaico foi reamostrada para 3 arco-segundos (~90 m), de forma a reduzir o tamanho dos dados e acelerar a velocidade dos processamentos. A declividade, originalmente fornecida em porcentagem, foi convertida para graus, buscando a linearidade exigida para operações matemáticas em processos de regionalização. A curvatura vertical, originalmente variando de valores negativos a positivos (côncavo a convexo), foi transformada em valores absolutos, caso contrário a média obtida nas unidades tenderia a valores nulos, caracterizando áreas como retilíneas independente da variação de curvatura. Por último, a orientação de vertentes foi decomposta em seno e cosseno, para permitir operações algébricas implícitas no seu processamento.

4.3.2 Elaboração de unidades de mapeamento

Propôs-se adotar a vertente como unidade de terreno, procurando-se delimitar trechos horizontais de vertentes que englobem todo o comprimento desde os divisores até os talvegues. Numa simplificação teórica, considera-se que cada elemento de vertente se caracteriza por uma orientação uniforme. Na prática, muitas vertentes apresentam flexões em sua direção de escoamento, o que requer algum grau de tolerância em relação aos desvios para que possam se estender por todo seu comprimento. A delimitação de vertentes por fatiamento da orientação em setores (quadrantes e octantes) mostra-se, portanto, uma solução simples e aparentemente eficaz. Em vez de uma única direção, considera-se uma faixa de direções em analogia ao conceito de setor circular, pelo que se propôs denominar tais unidades como *setores de vertente* (Figura 4.2).

Figura 4.2 - Orientação de vertente (A) e sua decomposição em seno e cosseno (B). A área usada como exemplo pertence à sub-unidade morfoescultural Serra do Mar Paranaense.



Fonte: Produção do autor.

Para que as vertentes fossem individualizadas livremente, aplicou-se técnicas de segmentação para que os setores fossem estabelecidos conforme a semelhança dos dados de orientação, delimitados, portanto, nas áreas de maior variação.

Independentemente de outras características do relevo, os valores de orientação de vertentes apresentam sempre sua maior variação nos divisores e nos talwegues, onde divergem e convergem, respectivamente, com cerca de 180° de diferença. Deflexões menores ocorrem horizontalmente ao longo de uma série de setores de vertentes adjacentes. A metodologia de delineamento dos setores de vertentes foi baseada na uniformidade de orientações, em que os maiores contrastes representam transições entre setores distintos, para posterior reagrupamento por classificação em unidades de terreno

(MEIJERINK, 1988), aplicadas sucessivamente em níveis hierárquicos (I, II, e assim por diante) crescentes.

O reconhecimento destas deflexões por subtração direta dos ângulos é dificultado por problemas numéricos devidos à natureza circular da orientação, que impossibilita operações algébricas como aquelas implicadas na estimativa da semelhança necessária ao processo de segmentação. Como solução, propôs-se aplicar a segmentação sobre suas componentes ortogonais nos eixos x e y, obtidas pelas operações de seno e cosseno, respectivamente. As áreas de uniformidade e as mudanças de orientação são indicadas pelas variações apresentadas por essas componentes. Observa-se que os limites verticais, do topo (divisores) e da base das vertentes (talvegues), correspondem aos locais de máximo contraste em ambas componentes pela contraposição de vertentes de orientações divergentes e convergentes, respectivamente.

Os limites laterais, por sua vez, foram estabelecidos pelo grau de tolerância (a variações) ou, inversamente, de similaridade, implícito no parâmetro *escala* da operação de segmentação (DRAGUT; BLASCHKE, 2006), que controla o tamanho dos objetos criados. Quanto menor a escala, mais estreitos devem resultar os setores de vertentes, o que é desejável do ponto de vista do detalhamento e da uniformidade das demais características de seu perfil. Porém, é necessário um nível de tolerância que garanta a contiguidade dos segmentos ao longo do perfil completo das vertentes, da base ao topo. O equilíbrio das duas condições foi o principal alvo dos testes iniciais.

Como preparação para a segmentação, a orientação de vertente foi decomposta em seno e cosseno, utilizando-se a função *Raster Calculator* do *ArcGis*. Os dois planos de informação foram a base para a segmentação no aplicativo *eCognition 9.0*. O algoritmo utilizado foi o multirresolução, que apresenta os parâmetros de forma, compacidade e tamanho. Para a definição dos melhores valores para cada parâmetro, foi utilizada uma abordagem baseada em análises exploratórias de tentativa e erro.

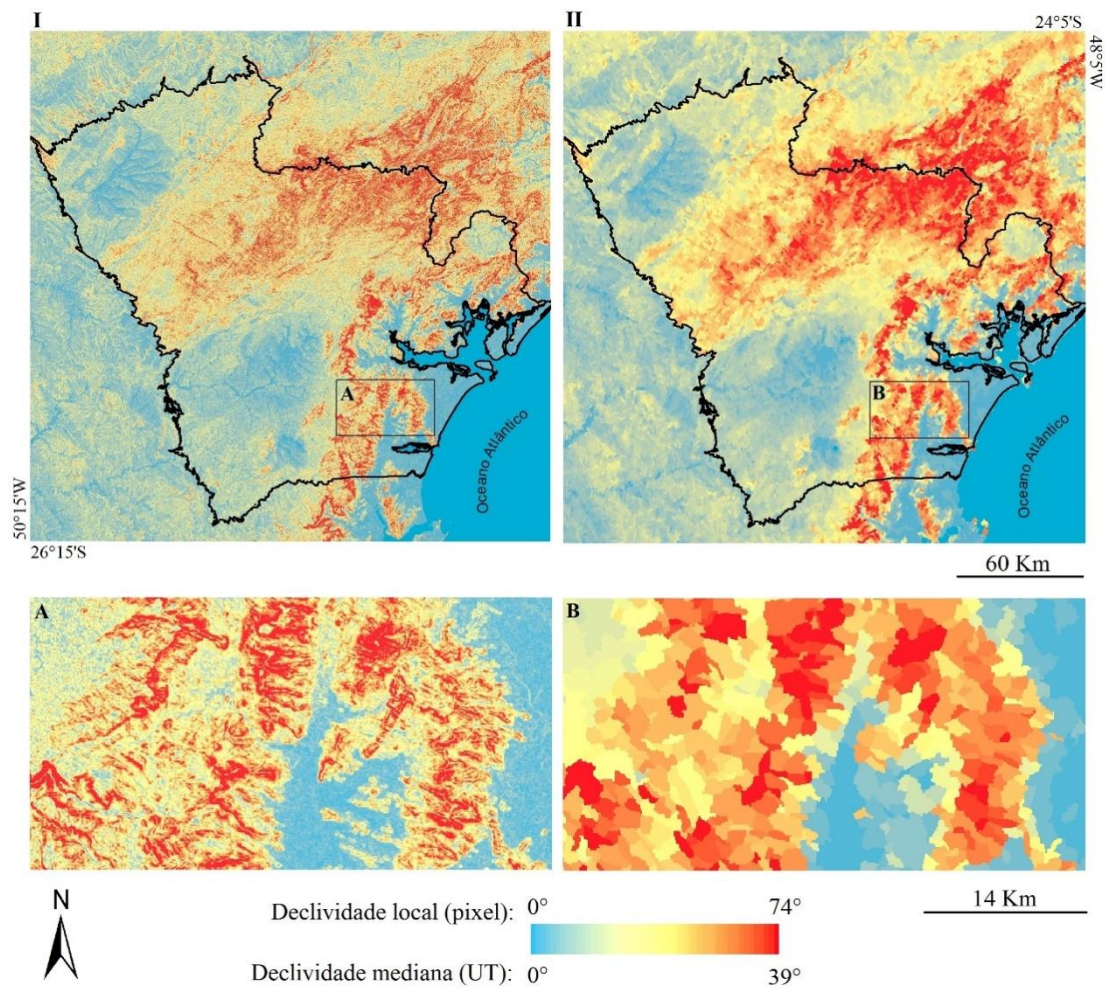
4.3.3 Caracterização de unidades

A caracterização das vertentes consistiu na regionalização de dados locais e derivação de variáveis regionais em cada setor delineado na segmentação das componentes da orientação. Estes dados foram analisados de forma exploratória, a fim de se verificar dentre elas quais poderiam melhor delinear terrenos ou feições geomorfológicas de maior nível hierárquico, bem como estruturas geológicas.

A regionalização das variáveis locais (elevação, declividade e curvatura vertical) foi dada a partir da atribuição de valores únicos a uma população de pixels adjacentes em cada unidade de terreno (Figura 4.3). As estatísticas incluem valores de média, mínimo, máximo e moda.

Os planos obtidos na regionalização da elevação (média, mínimo e máximo) foram utilizados para calcular as variáveis regionais altura topográfica, relevo relativo, integral hipsométrica, predominância do relevo e rugosidade. Essas variáveis foram escolhidas visto que, em análises exploratórias iniciais, apresentaram resultados bastante interessantes no ponto de vista geomorfológico e geológico.

Figura 4.3 – Exemplificação da metodologia proposta para a regionalização das variáveis locais.



I) Declividade local a nível de pixel e II) declividade local regionalizada a partir da extração da mediana em cada segmento. Em A e B é possível ver o detalhe da declividade local não regionalizada e regionalizada, respectivamente.

Fonte: Produção do autor.

4.3.4. Testes e aplicações

4.3.4.1 Coerência

Os resultados selecionados a partir da segmentação foram avaliados com o cálculo da *coerência* (VALERIANO; ROSSETTI, 2011), um descritor da uniformidade de vertentes para superfícies planas baseado na resultante regional de suas orientações. Os valores de coerência variam entre 0 e 1, sendo o valor 1 indicativo de maior uniformidade. A Equação 4.1 descreve o cálculo da coerência.

$$\sqrt{a^2 + b^2} \quad \text{Eq. 4.1}$$

onde: a = seno médio

b = cosseno médio

A média das componentes seno e cosseno foi extraída diretamente da população de pixels correspondentes ao segmento e atribuída à unidade de terreno. As operações de soma e raiz quadrada foram, então, realizadas entre os segmentos.

4.3.4.2 Comparação com filtros

Um dos problemas em relação à utilização de filtros é que, muitas vezes, essa técnica auxilia na regionalização, mas não garante abranger feições geomorfométricas por inteiro, como por exemplo uma vertente. Caso a vertente seja menor que o filtro, pode faltar clareza na sua delimitação (EVANS; MINAR, 2011). Nesse sentido, testes com filtros (janelas móveis) foram realizados para fins de comparação visual com as variáveis calculadas a partir da unidade de terreno. Para as variáveis locais foram testados filtros circulares de 5x5 e 7x7, baseando-se em testes exploratório iniciais. Para as variáveis regionais foram utilizados filtros circulares de 13x13 e 15x15, baseando-se na distância média entre dois interflúvios vizinhos (MARK, 1975).

4.3.4.3 Classificação das unidades de terreno

As variáveis obtidas pela caracterização foram compostas em uma única banda e serviram como entrada para o agrupamento. As unidades de terreno foram então agrupadas pelo método k-médias e depois classificadas observando as unidades de terrenos II, obtidas com as variáveis e o mapa geomorfológico oficial. Este método de agrupamento paramétrico e não-supervisionado se baseia na distância de observação ao centroide de cada grupo, onde cada centroide é alocado o mais distante possível entre si (BRAMER, 2007). Segundo alguns autores (WENDEL et al., 2016), este método tem se mostrado útil para discriminar objetos do meio físico, como por exemplo unidades de terreno. Para essa etapa, foram realizadas análises exploratórias para identificar o número ideal de agrupamentos. O uso de filtro em janela retangular de 8x8 foi realizado para suavizar ruídos.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

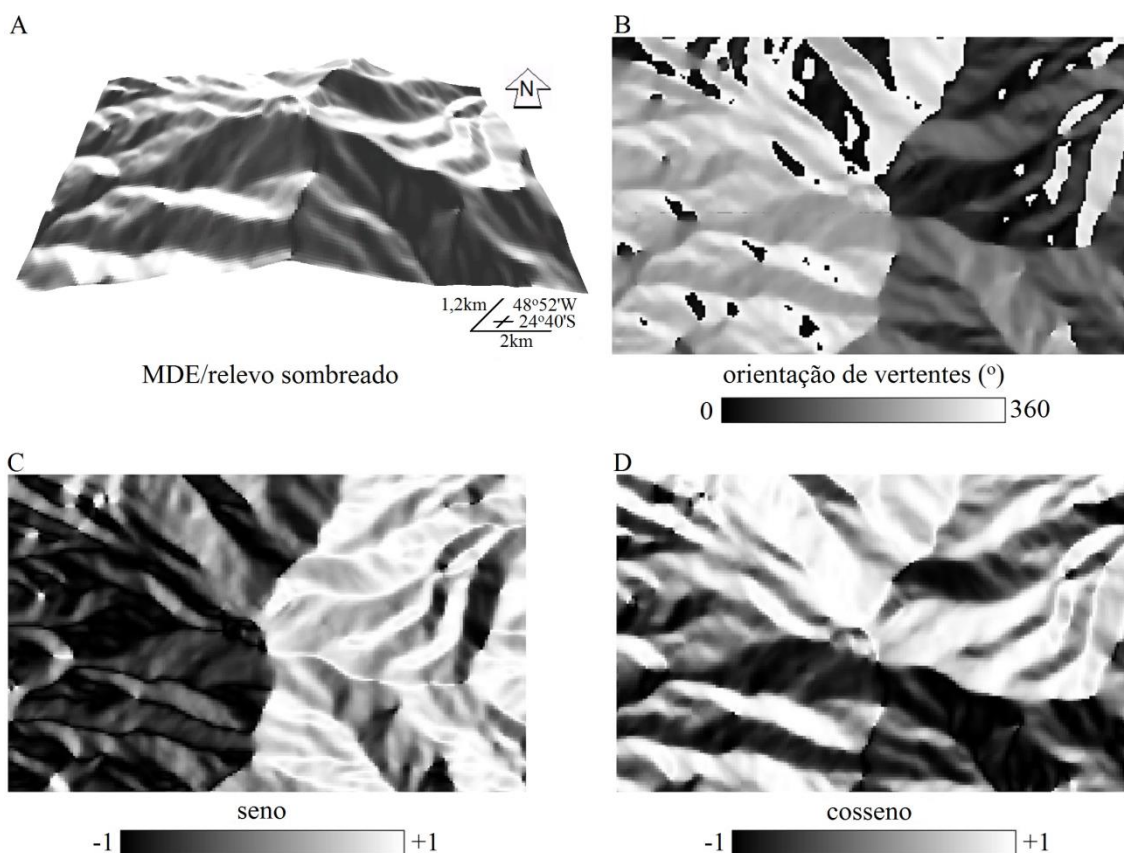
Neste capítulo, são apresentados os resultados referentes à delimitação das vertentes e à caracterização das unidades de terreno e, por último, as aplicações e a avaliação da metodologia proposta.

5.1 Delimitação das vertentes

O resultado de um teste exploratório de decomposição da orientação de vertentes em área do Planalto Dissecado de Adrianópolis, onde ocorre direções similares tangenciando o Norte e com valores próximos aos máximos e mínimos da orientação de vertentes (360° e 0°), resultou em contrastes numéricos artificialmente maximizados nos quadrantes NW e NE (Figuras 5.1A e 5.1B). A distribuição de contraste entre vertentes prevaleceu de W para E nos valores de seno (Fig. 5.1C) e de S para N nos valores de cosseno (Fig. 5.1D) de forma complementar.

Em cada componente (Figura 5.1C e 5.1D), contrastes máximos ocorreram entre vertentes de orientações opostas, assinalando seus limites verticais, tanto no topo (divisores), quanto na base (talwegues). Nuances intermediárias, áreas de uniformidade e mudanças de orientação expressam variações sugestivamente relacionadas aos limites laterais, ou, à definição de setores. Portanto, os limites laterais foram mais afetados pelo grau de tolerância à deflexão horizontal das vertentes (variações da orientação) ou, inversamente, de similaridade, implícito no parâmetro *escala* da operação de segmentação, que controla o tamanho dos objetos criados.

Figura 5.1 - Decomposição da orientação de vertentes nas componentes ortogonais em relevo correspondente ao Planalto Dissecado de Adrianópolis.



A) Perspectiva do local com relevo sombreado iluminado pelo Norte sobre perspectiva. B) Representações em escala linear dos valores de orientação de vertentes. C) Cosseno da orientação. D) Seno da orientação.

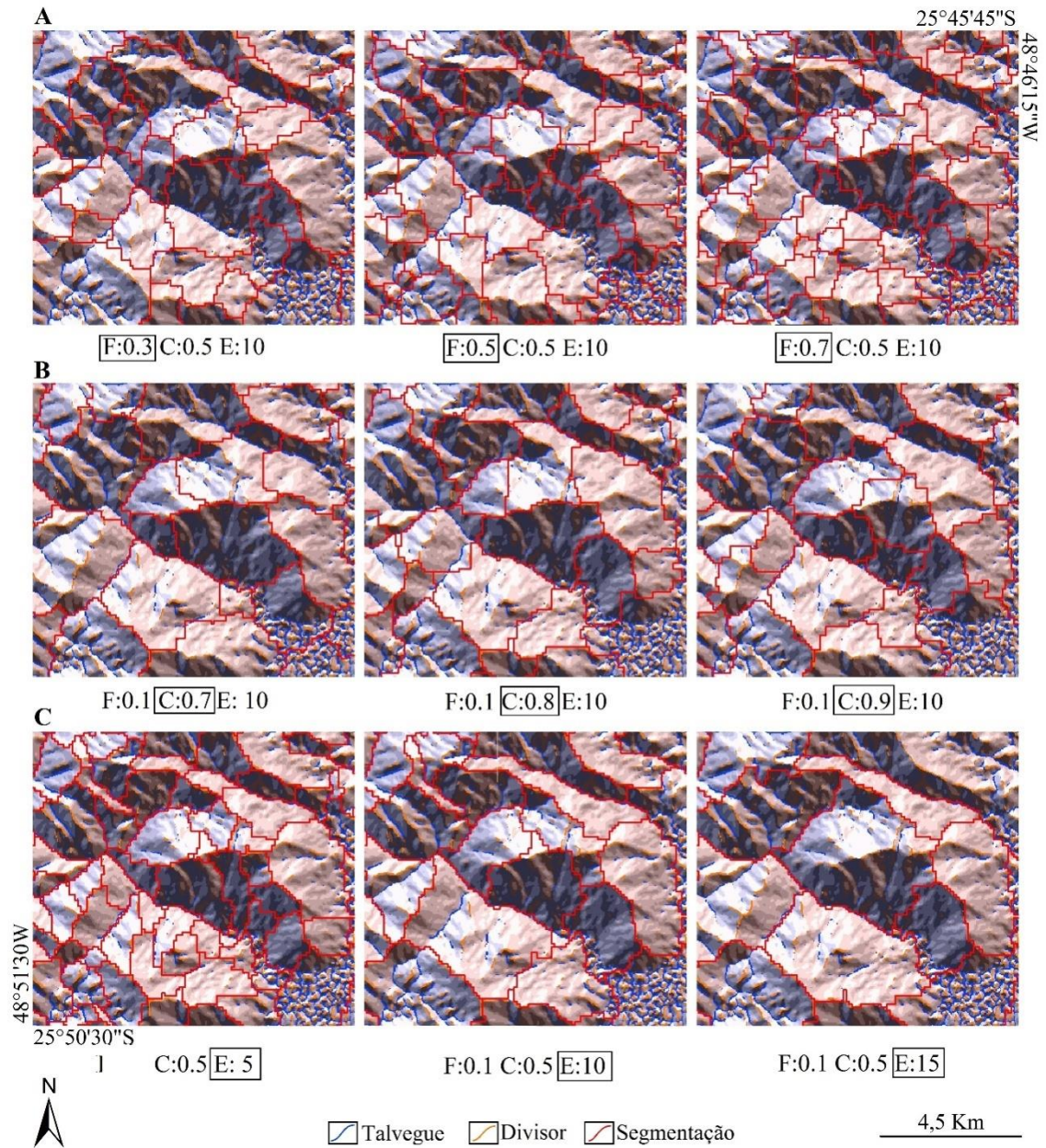
Fonte: Produção do autor.

Alguns testes exploratórios foram realizados em uma área da região dos Blocos Soerguidos da Serra do Mar, para identificar possíveis efeitos causados na mudança dos valores de outros parâmetros presentes dentro do algoritmo, como forma e compacidade. Primeiramente, esses parâmetros foram avaliados em três níveis, mantendo-se o mesmo fator escala (Figura 5.2) Observou-se que a alteração da forma causou grande ruptura no desenho da vertente, fazendo com que os limites dos segmentos ultrapassassem os limites verticais (maiores contrastes) impostos pela base e topo da mesma. Por outro lado, embora não houve diferença significativa entre as variações de compacidade e os valores padrão,

a análise atenta mostrou que os últimos tendem a respeitar mais os limites verticais, ou seja, não agrupa vertentes de orientações opostas.

Em relação à escala, o teste serviu para decidir qual tamanho delimitaria melhor a vertente na sua contiguidade lateral, visto que os limites verticais foram mantidos considerando os outros parâmetros como padrão. Foram então realizados testes de tentativa e erro, partindo-se da premissa que vertentes e setores de vertentes pertencem a uma escala de detalhe. Portanto, era esperado que os tamanhos dos segmentos fossem pequenos. Trabalhos anteriores utilizando o mesmo segmentador (p.e., GERENTE, 2018), concluíram que tamanho de segmento em torno de 60 é suficiente para a classificação regional. Portanto, os valores de tamanho de vertente para o caso testado aqui deveriam ser menores.

Figura 5.2 – Comparação dos resultados dos testes de segmentação de vertentes considerando-se três níveis dos parâmetros de forma, de compacidade e de escala em uma área da região dos Blocos Soerguidos da Serra do Mar, mantendo-se os outros parâmetros fixos.



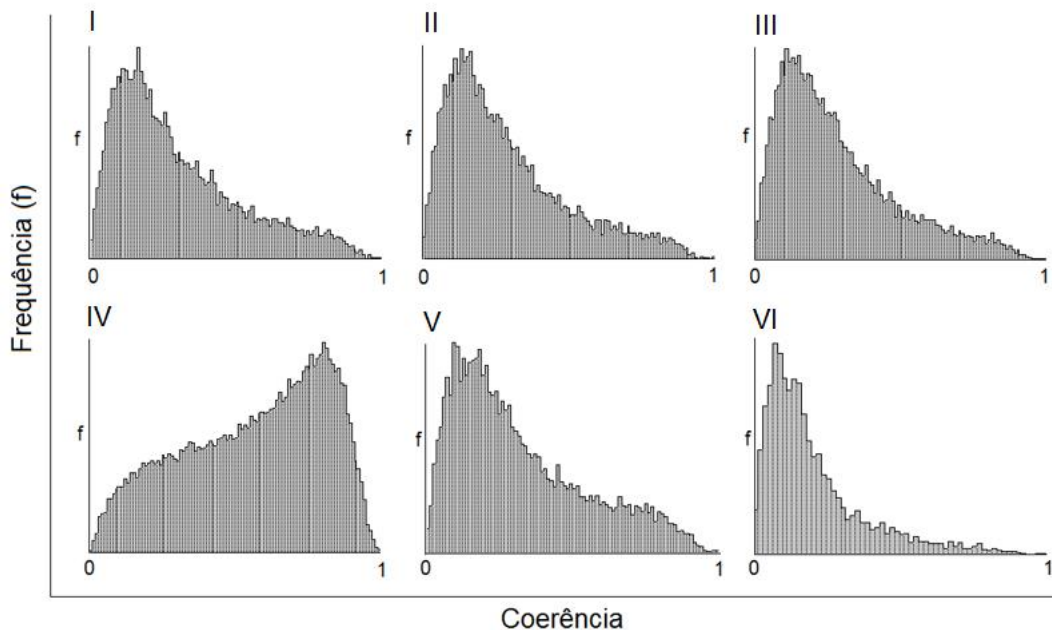
A) Três níveis de forma (F: 0.3, 0.5 e 0.7). B) Três níveis de compacidade (C: 0.7, 0.8 e 0.9). C) Três níveis de escala (E: 5, 10 e 15).

Fonte: Produção do autor.

Os testes de escala iniciaram no valor padrão (10), depois prosseguiu com um valor maior (15) e outro menor (5) (Figura 5.2). Observa-se que o tamanho 10 delimitou muito bem as vertentes, enquanto o tamanho 15 ultrapassou os limites laterais. O tamanho 5 permitiu delimitar segmentos englobando os limites verticais do perfil de grande parte das vertentes. Entretanto em algumas vertentes menos setorizadas, parece ter havido uma supersegmentação.

Os resultados selecionados foram avaliados com o cálculo da coerência. Os valores de coerência variaram entre 0 e 1. A Figura 5.3 mostra os histogramas das segmentações, desconsiderando os testes de forma que não respeitaram os limites propostos.

Figura 5.3 – Comparação dos histogramas de coerência dos testes de compacidade e escala obtidos com base em dados derivados da área analisada na região dos Blocos Soerguidos da Serra do Mar.



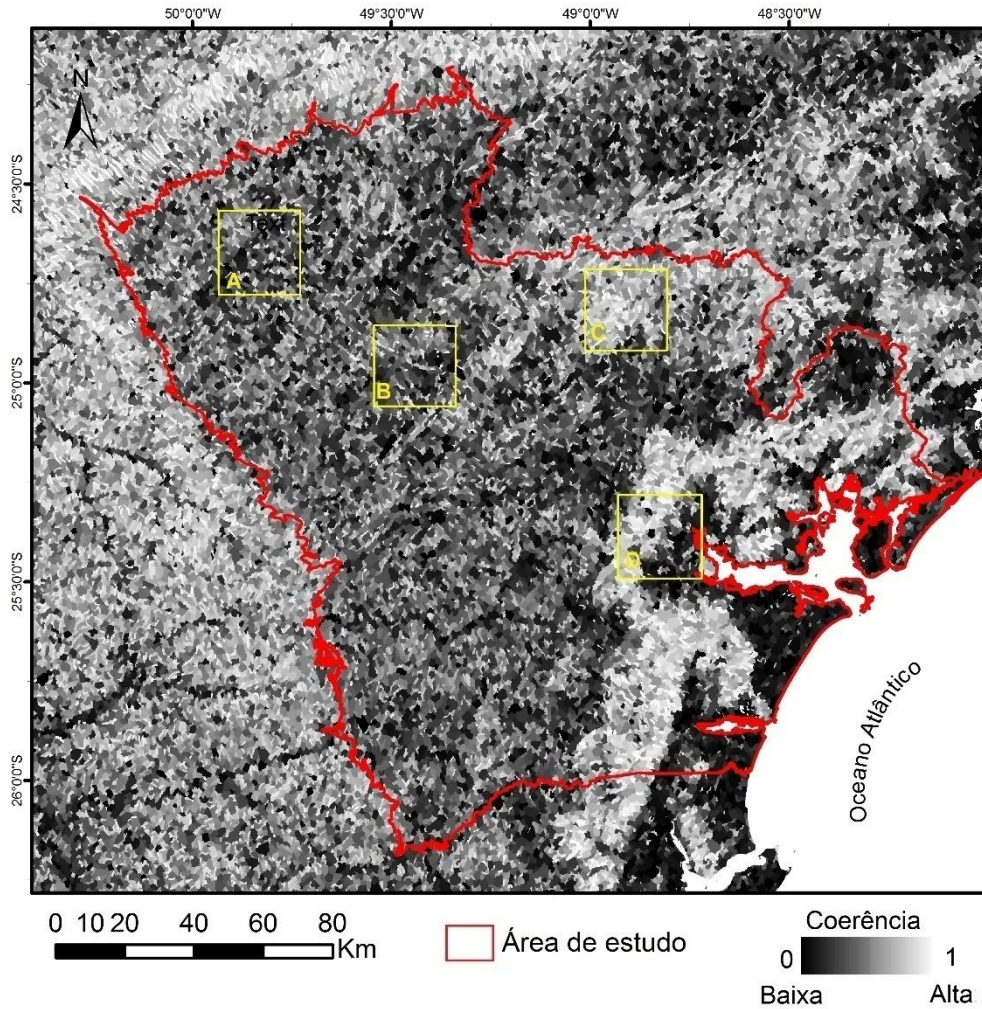
I) $F = 0,1$; $C = 0,7$ $E = 10$. II) $F = 0,1$; $C = 0,8$ $E = 10$. III) $F = 0,1$; $C = 0,9$ $E = 10$. IV) $F = 0,1$; $C = 0,5$ $E = 5$. V) $F = 0,1$; $C = 0,5$ $E = 10$. VI) $F = 0,1$; $C = 0,5$ $E = 15$.

Fonte: Produção do autor

Apesar de alguns efeitos de supersegmentação, o tamanho 5 obteve o melhor resultado no cálculo da coerência. Isto significa que os segmentos, em boa parte, correspondem a uma superfície relativamente plana.

A Figura 5.4 mostra o mapa de coerência da segmentação com a escala 5 obtido para a área de estudo. As regiões com os maiores valores de coerência correspondem aos terrenos montanhosos (serras) e ao Planalto Dissecado de Adrianópolis. Por sua vez, os valores medianos a baixos se distribuíram entre os demais terrenos geomorfológicos. É possível ainda notar que a segmentação seguiu alguns padrões de estruturação do escudo, sendo perceptível também na coerência. Isto é, áreas mais estruturadas ou mais retilíneas também obtiveram maiores valores de coerência. A Figura 5.5 mostra em detalhe como se deu a segmentação para os diferentes subtipos geomorfológicos.

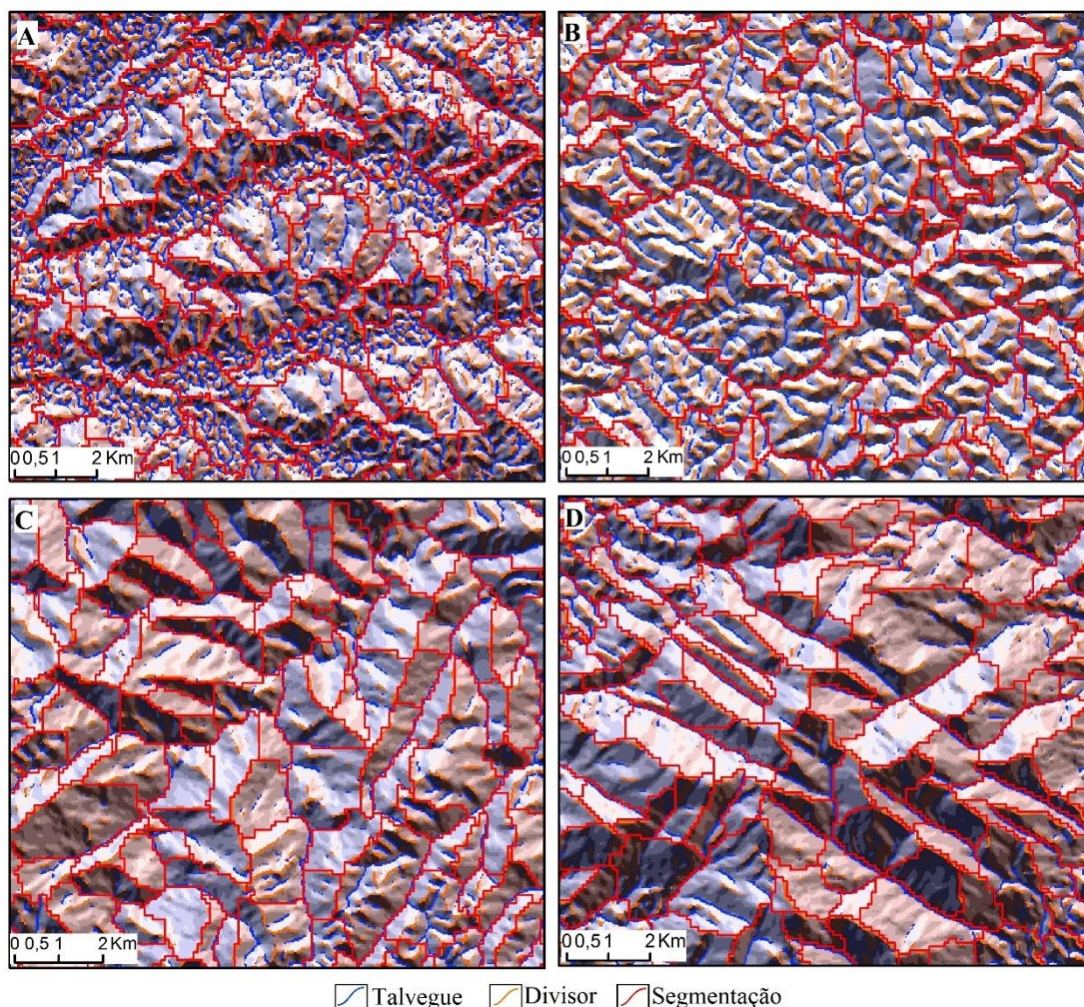
Figura 5.4 – Mapa da coerência calculada a partir dos segmentos de tamanho 5 para a área de estudo. Os polígonos amarelos indicam as áreas descritas na Figura 5.5.



Fonte: Produção do autor.

As Figuras 5.5A e B contêm exemplos de localidades da área de estudo com baixa coerência e relevo extremamente dissecado, o que contribui para vertentes e setores de vertente pequenos, tanto vertical quanto horizontalmente (áreas menores que 1 km^2). Os limites verticais, nestes casos, não foram respeitados, pois suas dimensões estão abaixo do tamanho do segmento utilizado. Limites verticais de tamanho menor que o aplicado poderia implicar em erros no restante da área, de vertentes maiores.

Figura 5.5 – Detalhe da segmentação dos setores da área de estudo destacados na Figura 5.4.



Sub-unidades morfoesculturais correspondentes ao: A) Planalto de Castro; B) Planalto Dissecado do Alto Ribeira; C) Planalto de Adrianópolis e D) Blocos Soerguidos da Serra do Mar e Serra do Mar Paranaense.

Fonte: Produção do Autor.

Por outro lado, o segmentador produziu o delineamento de maneira clara, dos limites verticais e horizontais do Planalto Dissecado de Adrianópolis e da Serra do Mar (Figuras 5.5C e 5.5D, respectivamente), onde as vertentes são maiores, tanto vertical, quanto lateralmente. Entretanto, na Serra do Mar e nos Blocos Soerguidos da Serra do Mar, algumas vertentes foram subdivididas ao longo de sua continuidade lateral em resposta à limitação do tamanho do segmentador.

Analisando-se os bons resultados de coerência e observando o predomínio de vertentes pequenas a médias (áreas menores que 1 a 2 km²), optou-se por trabalhar com o tamanho de escala 5, que conseguiu equilibrar uma disposição favorável dos segmentos para todos os tipos de vertente. Embora tenha havido “erros” de supersegmentação das vertentes maiores que 2 km², estimou-se que esses segmentos possam ser reagrupados novamente durante a regionalização, já que esses setores de vertente terão, provavelmente, valores regionais próximos. Por outro lado, uma vertente pequena que foi agrupada (subsegmentada) a outra vertente de orientação distinta, resultam em erros mais evidentes na regionalização.

5.2 Caracterização das unidades de terreno

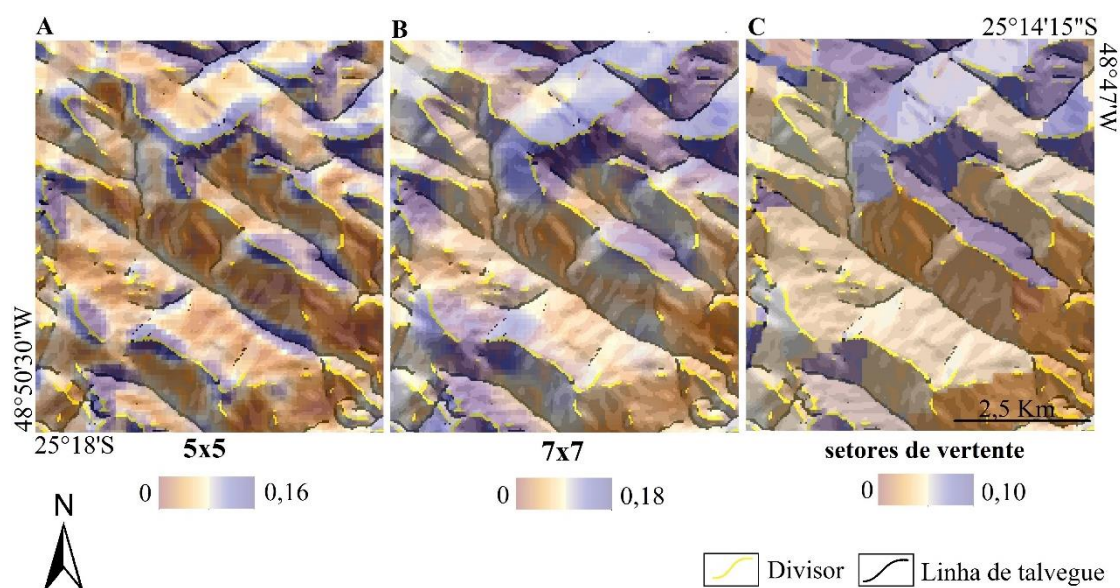
As unidades de terreno, delimitadas para representar setores de vertente, foram caracterizadas geomorfometricamente por regionalização de variáveis locais e geração de variáveis regionais. Foi avaliado o uso de setores de vertente como unidade para caracterização regional em contraposição ao uso de janelas móveis. Com vistas à sua aplicação em classificação, as variáveis foram avaliadas em relação à sua aderência às feições e entidades geomorfológicas previamente mapeadas.

5.2.1 Variáveis locais regionalizadas

Na comparação com a regionalização por filtros de média com janelas móveis de 5x5 e 7x7, observou-se que, o filtro 5x5 não abrangeu o tamanho da vertente, mostrando curvatura mais alta (diferente de plano) no topo das cristas, assim como valores altos na linha de talvegue (Figura 5.6A). Nesse caso, houve predomínio de variação entre segmentos de vertentes, com realce dos limites verticais (talvegues e divisores), sem que se obtivesse uma caracterização regional com diferenças entre vertentes. A cobertura completa do perfil das vertentes com o aumento da janela móvel (filtro 7x7) reduziu este problema, com a ampliação da área das unidades consideradas nos cálculos. Porém, houve uma contaminação entre as características das vertentes, o que resultou na difusão dos valores entre vertentes contrastantes através de linhas divisoras e talvegues (Figura 5.6B).

Os valores de curvatura vertical, regionalizados em setores de vertentes, apresentaram diferenças menores em valores absolutos, mas foram espacialmente estruturados em feições de escala mais geral. No detalhe exemplificado pela Figura 5.6C, os valores se distribuem em dois setores contíguos, relativamente uniformes e distintos entre si, com vertentes de maiores curvaturas ao norte e vertentes mais retilíneas ao sul.

Figura 5.6 – Comparação da curvatura vertical extraída da sub-unidade morfoescultural Serra do Mar regionalizada pelo filtro média 5x5 (A), 7x7 (B) e pela média zonal dos setores de vertente (C).



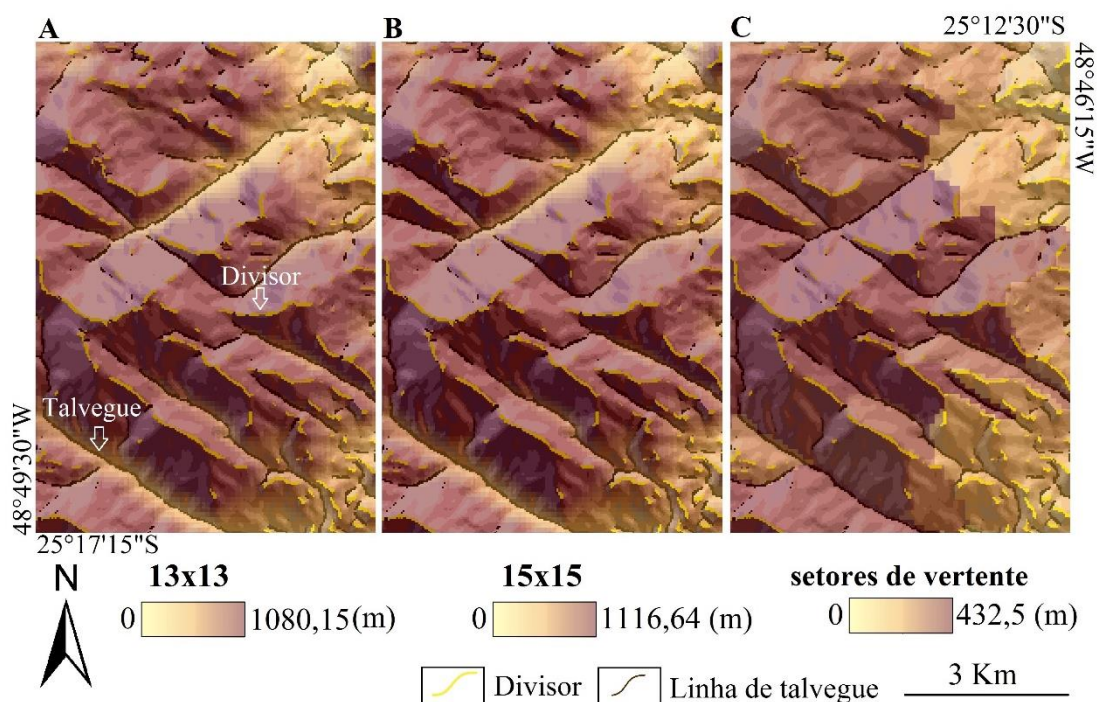
Observação: A curvatura vertical foi exposta sobre relevo sombreado, com demarcação das linhas de divisores e talvegues.

Fonte: Produção do autor.

Dentre as variáveis regionais, a altura topográfica se destacou pela diferenciação entre os planaltos dos dois blocos e pela definição da Serra do Mar, por isso ela foi escolhida para comparação com os testes feitos com filtros. Na Figura 5.7, é possível observar que entre os filtros de 13x13 (Figura 5.7A), considerado o mínimo para abranger a distância média entre dois interflúvios (MARK, 1975), e 15x15 (Figura 5.7B) há pouca diferença em termos de regionalização. Observa-se também que o gradiente de alturas crescentes a partir dos talvegues persiste em muitos vales adentro da região mais montanhosa da área apresentada. Ao se aplicar o mesmo cálculo da altura em setores de vertente (Figura

5.7C), houve uma pronta e evidente regionalização em perfis de vertentes completos e as médias se distribuíram em dois estratos distintos, delimitados independentemente da proximidade ou de contato com divisores e talvegues.

Figura 5.7 – Comparação da altura topográfica calculada por filtros de 13x13 (A), de 15x15 (B) e pela média zonal dos setores de vertente (C), para a região da sub-unidade morfoescultural Blocos Soerguidos da Serra do Mar.



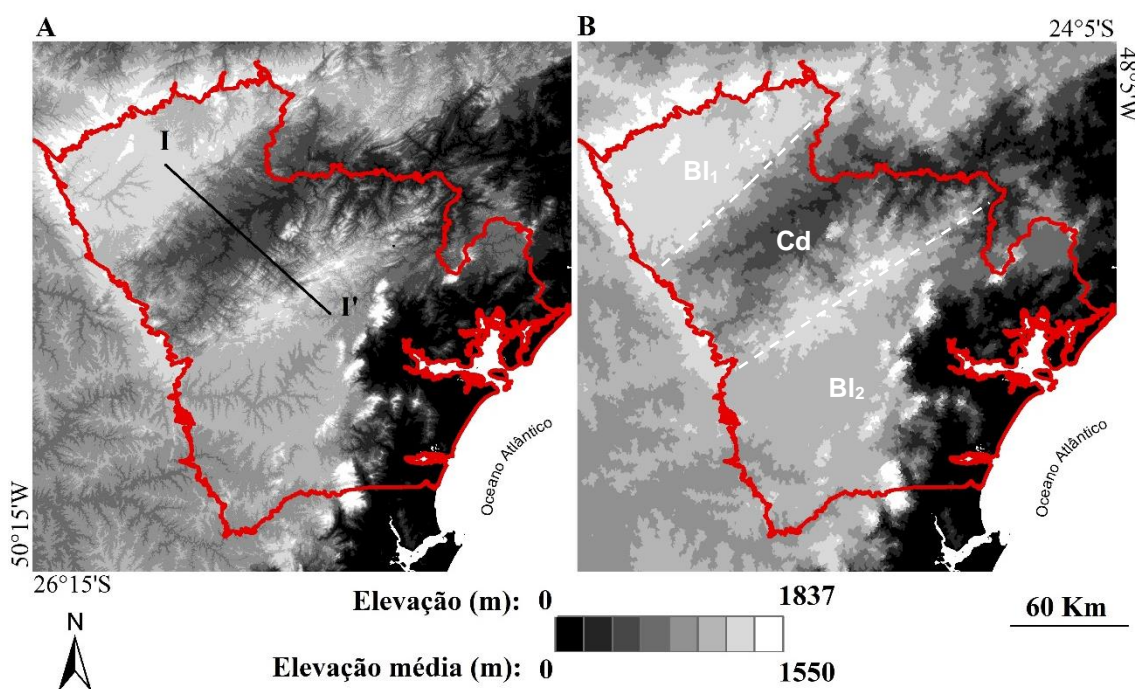
Observação: A altura topográfica foi exposta sobre relevo sombreado (ADD), com demarcação das linhas de divisores e talvegues.

Fonte: Produção do autor.

A observação conjunta dos resultados básicos deste estudo junto aos mapas oficiais em escalas crescentes revelou que a elevação média das vertentes tem potencial para a definição de unidades de maior nível hierárquico. A distribuição estratificada das médias unificou planaltos que possuem a mesma elevação, como por exemplo, os Planaltos de Castro e do Alto Jaguariaiva. Esse procedimento definiu pelo menos três grandes blocos de elevação homogênea na área de estudo, excluindo-se a região serrana e a planície litorânea (Figura 5.8). Considerando o uso estratificado de variáveis ao longo do processo de classificação de objetos (ANDERS et al., 2011), tais observações qualificam a

elevação média de vertentes como de grande potencial nos níveis mais gerais de classificação.

Figura 5.8 – Estratificação da elevação média das vertentes na área de estudo (linha vermelha).

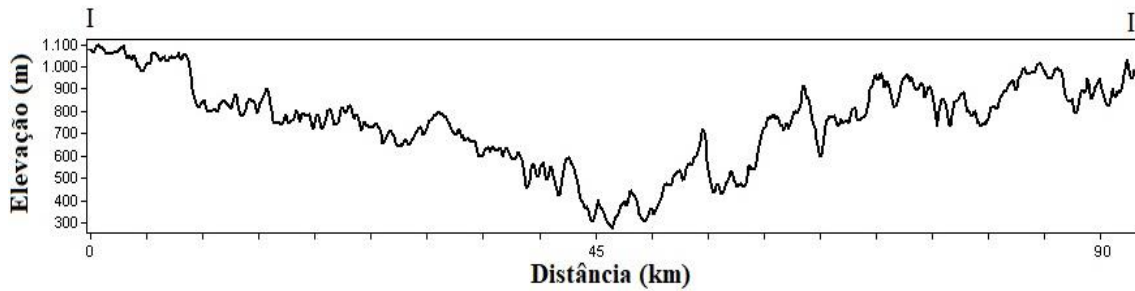


A) Elevação local (I-I' = transecto topográfico da Figura 5.9); B) Elevação local regionalizada com a divisão da área de estudo em três partes: Bl₁ - bloco 1 (Planalto de Castro e Planalto do Alto Jaguariaiva); Cd - corredor de dissecação (Planalto Dissecado do Alto Ribeira, Planalto Dissecado de Rio Branco do Sul, Planalto Dissecado de Tunas do Paraná (parcial) e Planalto Dissecado de Adrianópolis); e Bl₂-bloco 2 (Planalto de Curitiba, Planalto de Alto Iguaçu, Blocos Soerguidos do Primeiro Planalto e Planalto Dissecado Tunas do Paraná).

Fonte: Produção do autor

A Figura 5.9 mostra o perfil topográfico da região destacada ao centro, onde se nota rebaixamento da elevação e aumento do volume de dissecação.

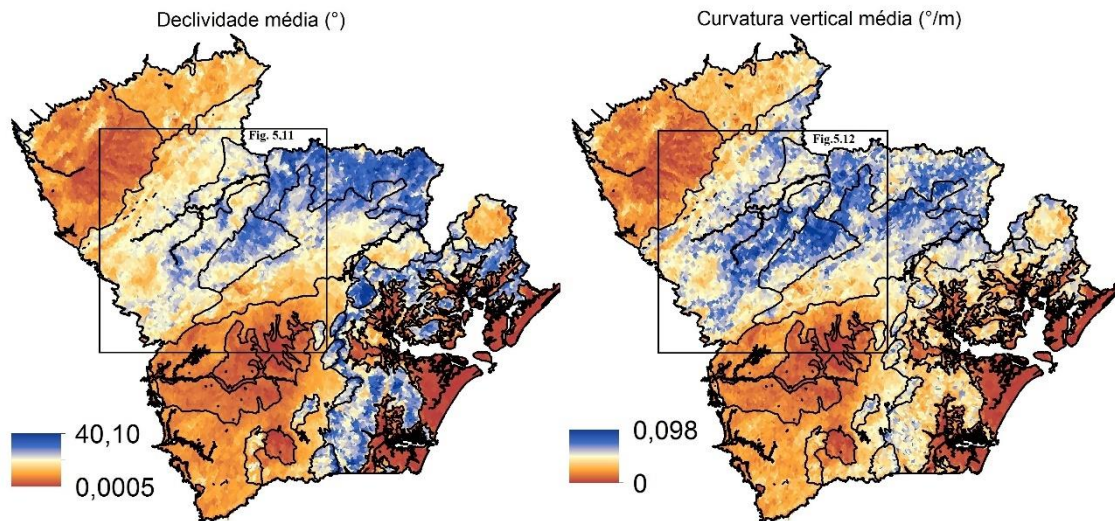
Figura 5.9 – Transecto topográfico I-I' (ver localização na figura 5.8A).



Fonte: Produção do autor

As variáveis declividade e curvatura vertical, regionalizadas por média, foram úteis na descrição de terrenos cristalinos, evidenciando feições geomorfológicas de maior escala do que elevação, como planaltos, planícies e serras. É bastante notável visualmente a diferenciação de planaltos, tanto do Bloco 1 quanto do Bloco 2, e parcialmente das planícies fluviais. Tanto a declividade quanto a curvatura vertical realçaram os planaltos de Castro e Alto Jaguariaiva. Contrastes entre as demais subunidades mudam de acordo com as variáveis. A declividade permitiu distinguir o Planalto de Alto Iguaçu dos Planaltos Dissecados e da Serra do Mar, bem como parte do Complexo Gnaissico-Migmatítico. A curvatura diferenciou o Planalto de Curitiba, que está dentro do Planalto de Alto Iguaçu. A região serrana (relevo montanhoso) teve valores baixos a moderados de curvatura vertical, o que definiu as vertentes como predominantemente retilíneas (Figura 5.10).

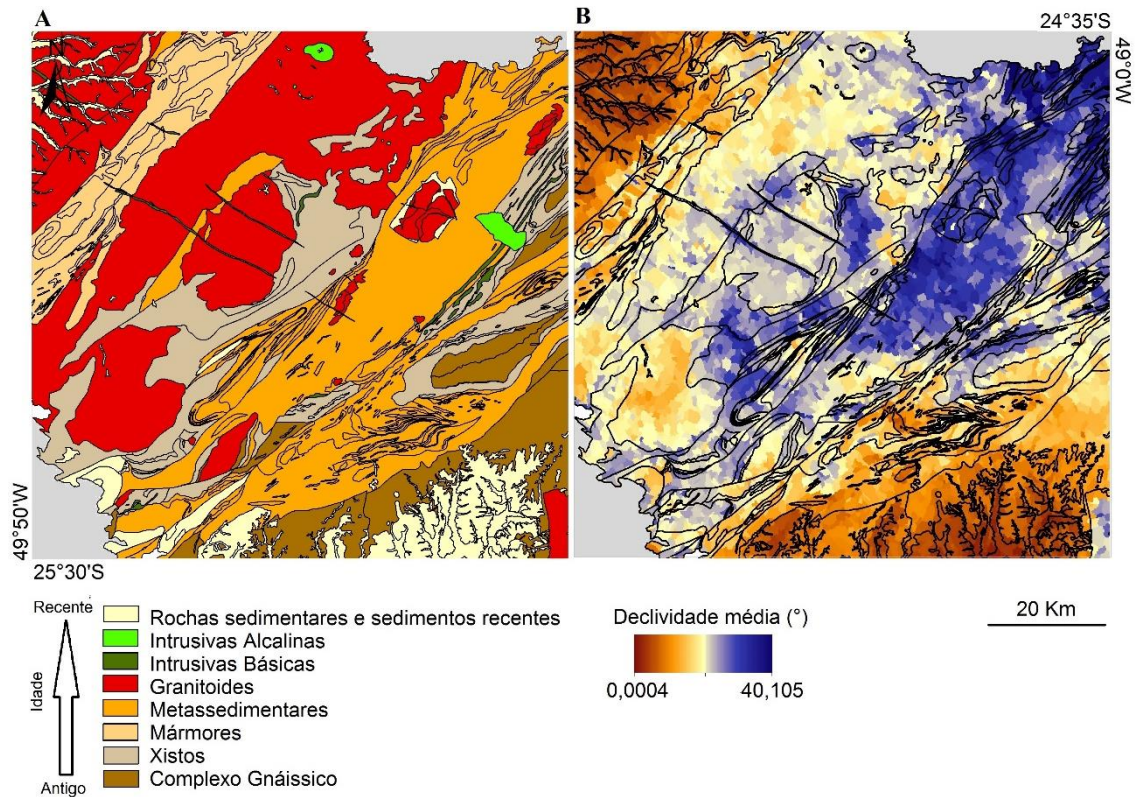
Figura 5.10 - Declividade e curvatura vertical regionalizadas para a área de estudo, com sobreposição dos domínios geomorfológicos indicados na Figura 3.4. Os polígonos destacados indicam a localização das Figuras 5.11 e 5.12.



Fonte: Produção do autor

As variáveis locais regionalizadas não apresentam, de modo geral, nenhuma feição geomorfológica que evidencie a distinção entre os planaltos na região dissecada. Entretanto, para essa mesma região, foi possível destacar algumas feições que podem estar associadas a diferentes formações geológicas. Por exemplo, a regionalização da declividade realçou os granitoides, uma parte dos mármore e rochas calcissilicáticas do Grupo Açungui e caracterizou, em outro grupo, as rochas metassedimentares (Grupo Açungui) e os xistos (Grupo Setuva) (Figura 5.11).

Figura 5.11 – Comparação entre a geologia e a regionalização da declividade em um setor dos planaltos dissecados da área de estudo (ver localização na figura 5.10).



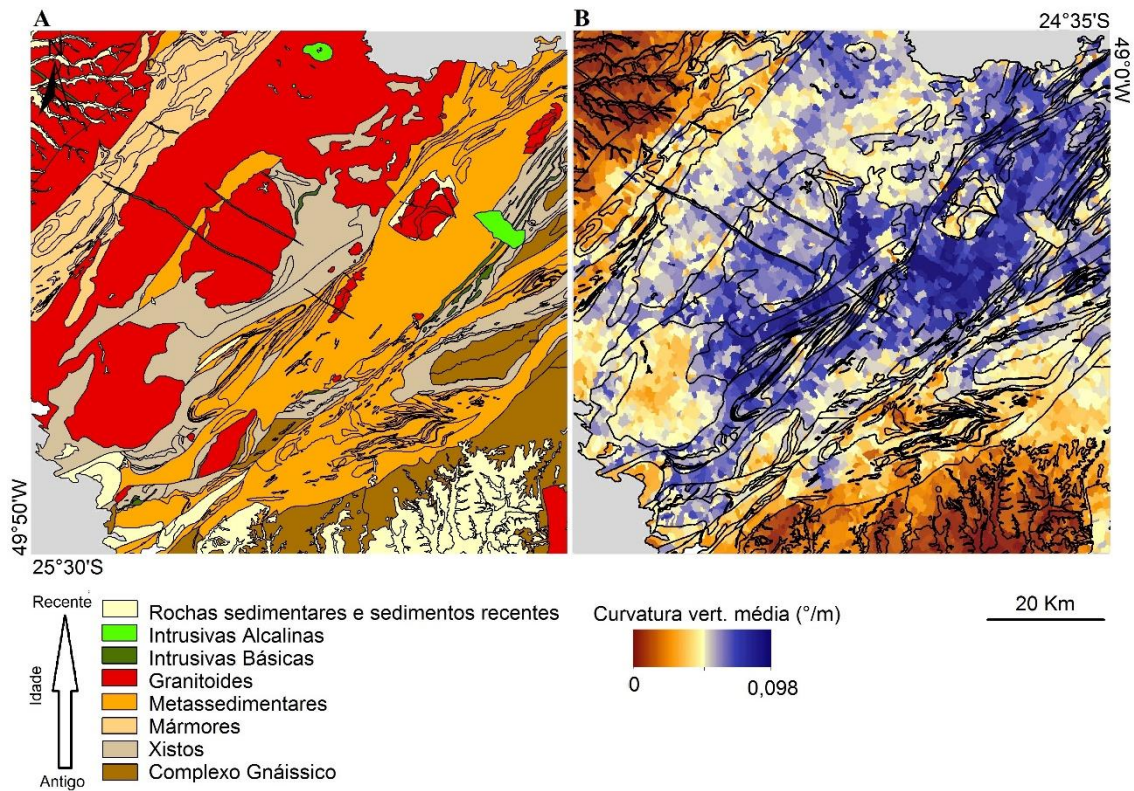
A) Mapa simplificado com as principais litologias de cada grupo geológico. B) Declividade regionalizada, sobreposta no mapa da figura A. Na região do corredor dissecado, a declividade distinguiu parcialmente granitoides de xistos e uma parte das rochas metassedimentares.

Fonte: Produção do autor

A distribuição da curvatura vertical regionalizada delineou as rochas intrusivas alcalinas, bem como os xistos dos complexos gnáissicos e uma parte dos granitoides, individualizando-os dos xistos e das metassedimentares (Figura 5.12).

As rochas foliadas, como os xistos e as metassedimentares possuem, em geral, maior valor de curvatura e de declividade, enquanto os granitoides e gnaisses possuem valores moderados, desconsiderando os granitoides que estão na porção mais elevada (canto superior esquerdo das Figuras 5.11B e 5.12B).

Figura 5.12 – Comparação entre a geologia e a regionalização da curvatura vertical.



A) Mapa litológico simplificado com as principais litologias de cada unidade. B) Curvatura vertical regionalizada sobreposta no mapa da figura A. Na região do corredor dissecado, a curvatura distinguiu, parcialmente, uma porção dos granitoides, as rochas intrusivas alcalinas, uma porção das rochas sedimentares, e ortognaisses e xistos.

Fonte: Produção do autor

5.2.2 Variáveis regionais

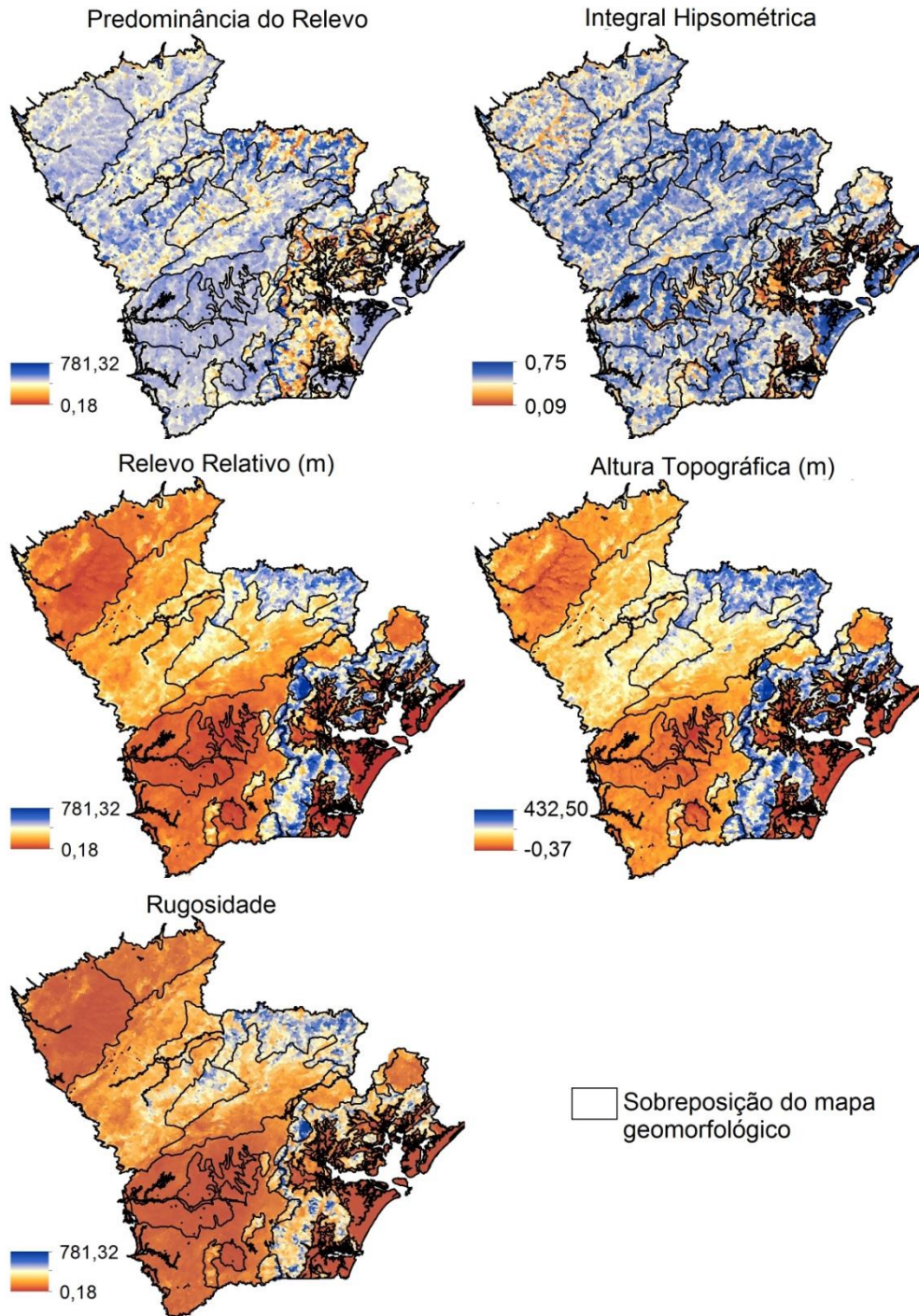
Observou-se, ainda, pequena correlação entre a predominância do relevo e a integral hipsométrica, e outra entre o relevo relativo e a altura topográfica. Por exemplo, a predominância do relevo permitiu distinguir a Serra do Mar e suas áreas no entorno (Rampas Pré-Serra, Blocos Soerguidos e Morros Isolados Costeiros), caracterizando um alto predominante onde as vertentes são extensas e pouco erodidas. Houve realce de toda a região de serra, com alguma evidência dos Blocos Soerguidos pelos valores mais altos (Figura 5.14). A integral hipsométrica, parcialmente correlacionada à

predominância, evidenciou apenas as áreas de serra caracterizadas pela menor dissecação, porém de modo geral não serviu para destacar outra unidade geomorfológica específica.

O relevo relativo e altura topográfica mostraram-se bastante correlacionados, entretanto a segunda variável mostrou maior variação entre as subunidades do bloco 2 do Primeiro Planalto Paranaense. Ambas as variáveis conseguiram separar o corredor de dissecação dos outros planaltos e evidenciaram o contorno do Planalto de Adrianópolis. Pode-se observar, também, uma estruturação NW-SE e outra NE-SW, esta demarcada pelo contato entre o Bloco 1 com o corredor dissecado. Os Blocos Soerguidos do Primeiro Planalto e parte do complexo Gnáissico-Migmatítico, bem como a região da Serra do Mar, foram definidos, junto aos Blocos Soerguidos, embora com um pouco de sobreposição entre os valores dos dois últimos. Porém, estas variáveis não conseguiram destacar as Rampas de Pré-Serra (Figura 5.15).

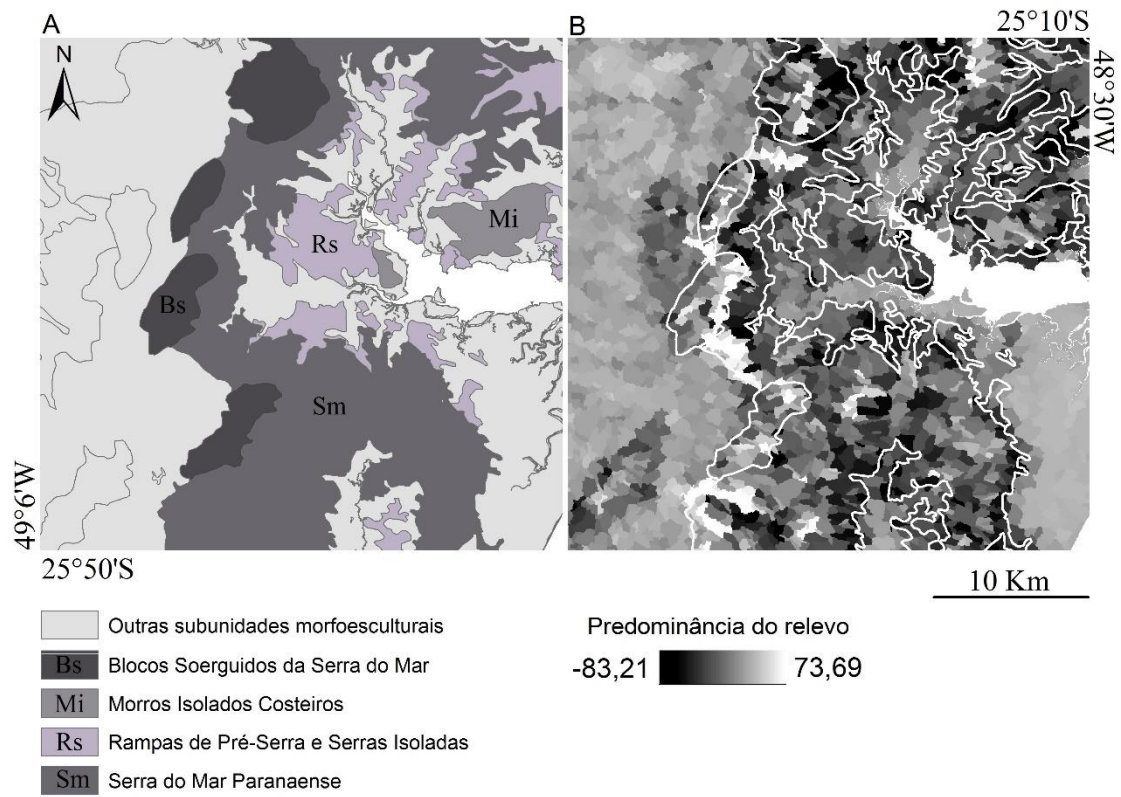
A rugosidade mostrou-se homogênea nos planaltos elevados, separando-os do corredor de dissecação, mas essa variável não foi suficiente para uma classificação, visto que suas informações foram redundantes.

Figura 5.13 – Resultado do cálculo das variáveis regionais para a área de estudo, utilizando setores de vertente, sobrepostas pelos limites dos domínios geomorfológicos (Figura 3.4).



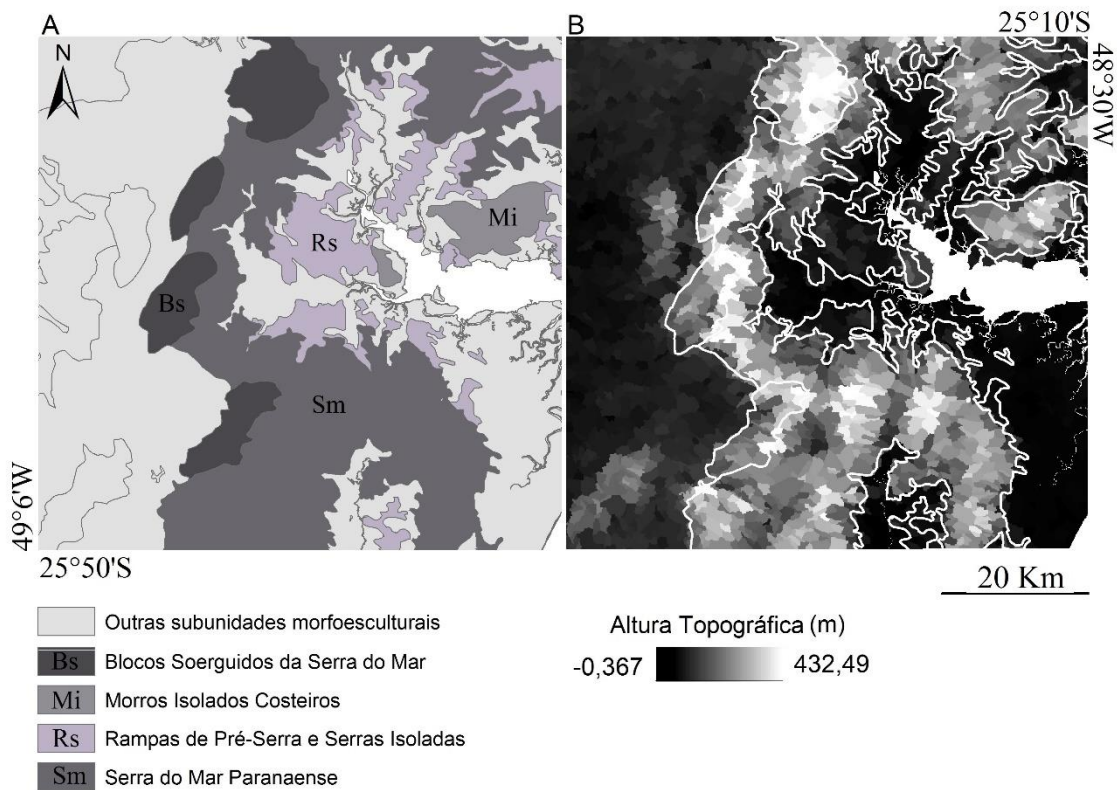
Fonte: Produção do autor

Figura 5.14 – Comparação entre a geomorfologia (A) e a predominância do relevo (B).
Linhas brancas em B indicam limites geomorfológicos oficiais.



Fonte: Produção do autor.

Figura 5.15 – Comparação entre a geomorfologia (A) e a altura topográfica sobreposta pelos limites geomorfológicos oficiais (B).



Fonte: Produção do autor

5.2.3 Agrupamento das unidades

A análise de correlação comprova o que foi observado anteriormente. As variáveis A e R encontram-se moderadamente correlacionadas (0,57), assim como a Hi e P (0,69). A Kv e a S apresentam-se bastante correlacionadas (0,88). Entretanto, observa-se que na comparação com as demais há pouca correlação, com um grau menor que 0,35, sugerindo bons atributos para classificação.

Tabela 5.1 - Análise de correlação das variáveis geomorfométricas testadas para a área de estudo.

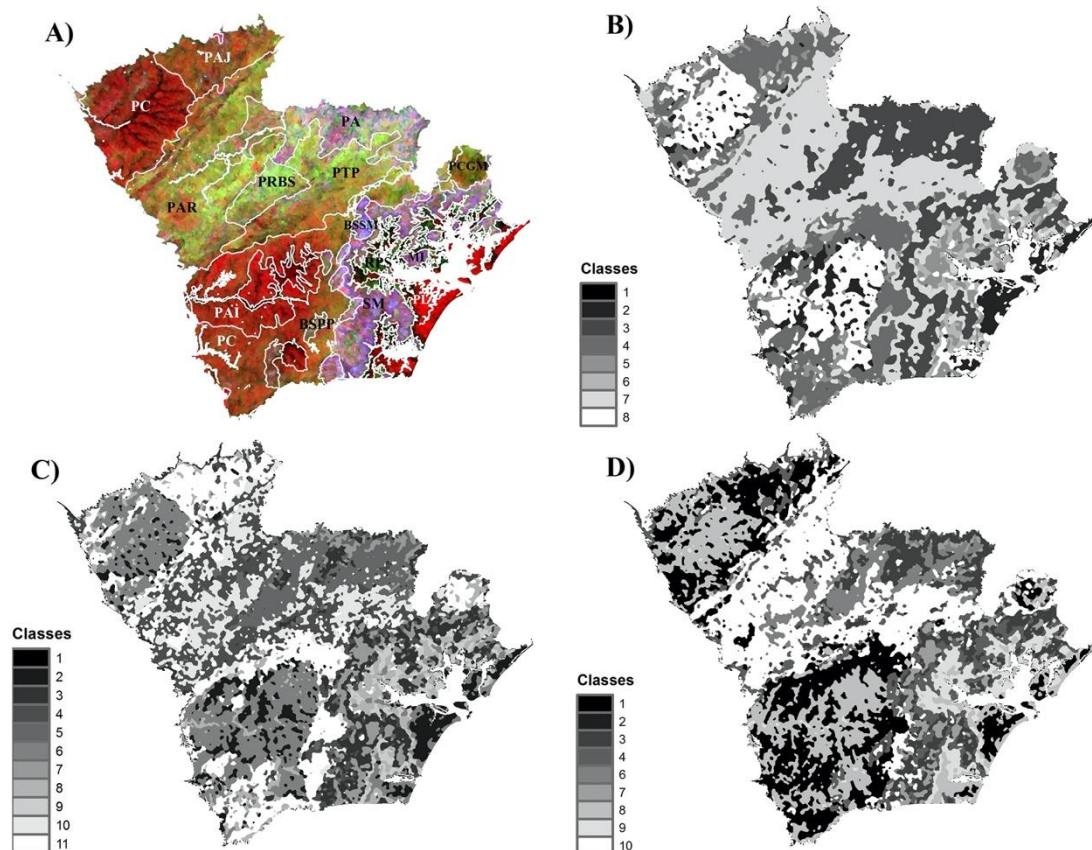
	T	A	Kv	S	R	Hi	P
T	1						
A	0,13097	1					
Kv	0,3347	0,27873	1				
S	0,32422	0,25486	0,88363	1			
R	0,14034	0,56841	0,26587	0,23142	1		
Hi	0,0405	0,24656	0,07351	0,04996	0,16055	1	
P	-0,00715	0,08367	-0,02932	-0,0337	-0,23642	0,69049	1

Fonte: Produção do autor.

Com o objetivo de testar o grau de satisfação da metodologia para fins de regionalização, foi realizada uma análise de agrupamento (k-médias) com a composição das sete variáveis. O número de agrupamentos foi definido a partir de uma análise exploratória, comparando-se a imagem resultante da composição das sete “bandas geomorfométricas” (onde cada banda é correspondente a uma variável geomorfométrica) e o mapa geomorfológico oficial, sabendo-se que este possui 17 sub-unidades morfoesculturais, excluindo-se os corpos d’água. A partir de 17 classes, não houve ganho de informação, com mistura de classes, por isso se procedeu com a análise dos agrupamentos considerando-se 15, 16 e 17 classes (Figura 5.16).

Um filtro moda retangular de tamanho 8 foi aplicado para a generalização da informação intraclasse. A Figura 5.16B mostra o agrupamento com 15 classes, reduzido a 8 após aplicação do filtro. É possível observar que, em comparação a imagem de entrada (Figura 5.16A), os planaltos de Castro (PC), do Alto Jaguariaíva (PAJ), do Alto Iguaçu (PAI) e o de Curitiba (PCu) foram bem delimitados relativos ao corredor de dissecação. Nessa região houve grande confusão entre os planaltos dissecados, sendo o Planalto de Adrianópolis (PA) delimitado de forma bastante generalizada. A Serra do Mar (SM) dividiu-se em duas classes e o Planalto do Complexo Gnaissico-Migmatítico (PCGM) foi delimitado apenas em sua porção leste.

Figura 5.16 – Comparação dos resultados da análise de agrupamento com base nas variáveis geomorfométricas estudadas. A) Imagem em *RGB* composta das 7 variáveis de entrada sobreposta pela geomorfologia (linha branca); B) Cluster com 15 classes; C) Cluster com 16 classes e D) Cluster com 17 classes.



Símbolos em A indicam: PC = Planalto de Castro; PAJ = Planalto do Alto Jaguariaíva; PAR = Planalto Dissecado do Alto Ribeira; PRBS = Planalto Dissecado do Rio Branco do Sul; PTP = Planalto Dissecado Tunas do Paraná; PA = Planalto Dissecado de Adrianópolis; PAI = Planalto do Alto Iguaçu; PCu = Planalto de Curitiba; BSPP = Blocos Soerguidos do Primeiro Planalto; BSSM = Blocos Soerguidos da Serra do Mar; SM = Serra do Mar; RPS = Rampas de Pré-Serra; MI = Morros Isolados Costeiros; PCGM = Planalto do Complexo Gnaissico-Migmatítico; PL = Planície Costeira.

Fonte: Produção do autor.

O agrupamento com 16 *clusters* (Figura 5.16C) foi similar ao de 15 *clusters*, com exceção ao corredor de dissecção, onde houve muita confusão entre as classes e pouca correlação com os planaltos dissecados. Entretanto, o PA parece ter tido um ganho na sua

delimitação, correspondendo melhor com a imagem de entrada. Os planaltos PCu e PAI foram mais bem delimitados e por isso evidenciaram os Blocos Soerguidos do Primeiro Planalto (BSPP).

Por último, o agrupamento com 17 *clusters* (Figura 5.16D) separou muito bem os dois blocos (Bl₁ e Bl₂) do corredor de dissecação, bem como evidenciou as faixas de dobramento do Grupo Açungui. Esse agrupamento distinguiu, também, o PA e uma parte do Planalto Dissecado Tunas do Paraná (PTP). Porém, houve confusão intraclasse para os dois blocos.

Em relação à morfologia serrana, as rampas e morros isolados foram de difícil diferenciação em todos os testes, visto que se confundiram com a SM. Para todos os agrupamentos, o PCGM foi apenas delimitado na sua porção leste, pois se confundiu com o PTP.

Deste modo, após uma análise criteriosa de todos os agrupamentos e, excluindo-se os polígonos pequenos (< 2 km²), foi possível fazer uma classificação. A Tabela 5.2 mostra a relação dos agrupamentos com a definição de cada classe. Esta classificação foi realizada com base no mapa geomorfológico, visto que as variáveis, em sua maioria, seguiram os padrões geomorfológicos, exceto no corredor de dissecação. Nesta região, embora tenha havido a distinção de alguns corpos geológicos, esta não foi considerada suficiente para uma classificação geológica.

Tabela 5.2 – Relação de número de clusters com as entidades geomorfológicas da área de estudo.

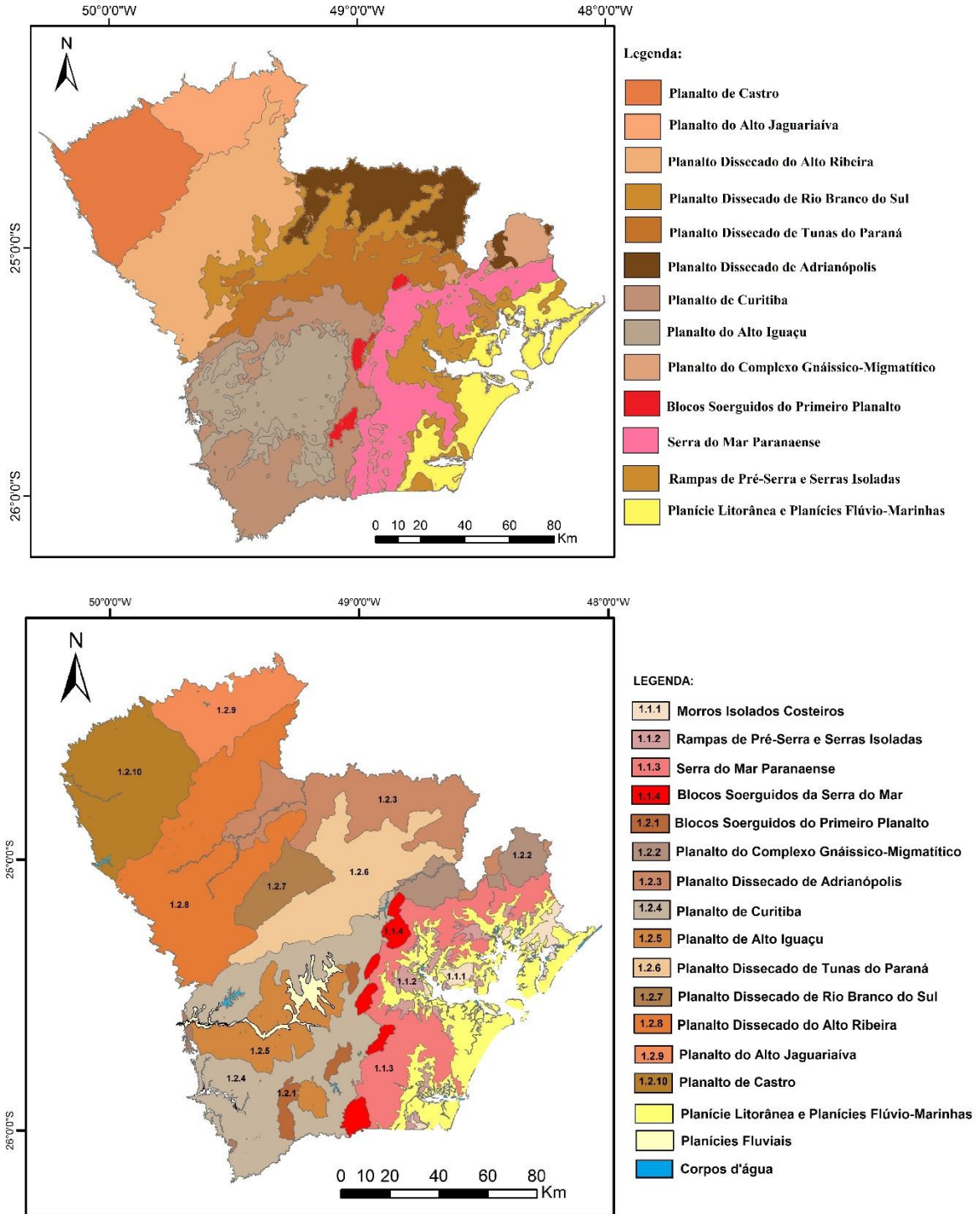
Nº de clusters	Nº de classes detectadas	Entidades geomorfológicas delimitadas
15	8	PC, PAJ, PAI, PC, SM e PCGM
16	11	PC, PAJ, PAI, PCu, SM, PCGM, BSPP e PDTP
17	10	PDA, PDTP, SM e RPS

Fonte: Produção do autor.

Após a extração das classes em cada agrupamento, fez-se uma pós-classificação para a combinação dos polígonos pertencentes à mesma entidade geomorfológica. A Figura 5.17 mostra o resultado da classificação em comparação ao mapa geomorfológico oficial.

Os planaltos PC e PAJ corresponderam muito bem à delimitação original. Como pontos de destaques, houve boa separação das classes da SM e do PA, embora com pequena confusão do PA com o PAR. Pela análise de agrupamento, a SM foi dividida em dois grupos, o que se deve pelos valores mais elevados nas variáveis A e P. Isto poderia representar um corredor de blocos soerguidos, e não isolados. No entanto, eles foram classificados como somente SM neste trabalho. Os terrenos do PRBS foram de difícil delimitação, se misturando ao PTP. Isto era esperado pois, analisando as variáveis, nenhuma conseguiu destacar, de forma clara, os planaltos da região. As RPS foram difíceis de distinguir dos MI, pois se assemelham nos atributos geomorfométricos aqui analisados. O PAI teve sua área aumentada e se confundiu com alguns dos BSPP. O PCGM foi bem delimitado na sua porção a leste, mas não se destacou do PTP.

Figura 5.17 – Comparação entre a classificação geomorfológica deste trabalho (A) e o mapa geomorfológico oficial da área de estudo (B). A legenda foi simplificada para fins de comparação.



Fonte: Produção do autor.

Com a análise visual da segmentação, foi possível perceber que os segmentos dos setores de vertente com uma área uniforme maior, como por exemplo dos Blocos Soerguidos da Serra do Mar, seguiram com maior precisão os limites verticais das vertentes. Ao passo que as áreas dissecadas e com vertentes com menor superfície planar tiveram seus segmentos cruzando os limites de talvegue e cumeeira. Isso se explica pela região possuir diferentes tamanhos de vertente. Logo, seria necessário a separação destes atributos geomorfológicos antes da segmentação para identificar o tamanho de segmento mais adequado. A Figura 5.4 confirma valores maiores de coerência para a região da Serra do Mar e o Planalto Dissecado de Adrianópolis, ambos terrenos com vertentes expressivas. O cálculo da coerência, para essas regiões, também poderia servir como um atributo para o agrupamento dessas regiões

Com os resultados dos agrupamentos, foi possível observar que o Planalto Dissecado de Adrianópolis se destacou muito bem dos outros planaltos na região do corredor de dissecção, bem como a região da Serra do Mar. No entanto, os demais planaltos dissecados apresentaram-se com classes muito confusas. Em nenhuma das variáveis regionais foi possível a identificação ou delimitação desses terrenos geomorfológicos. Além do problema com a baixa coerência, isto pode ser explicado pelo fato da região ser muito homogênea em questões de elevação, nível de dissecção e diferença de altitude. O Cd representa uma área de baixa elevação, principalmente em comparação com os demais blocos, e pode ser resultado de um alto nível de erosão devido a presença de rochas metamórficas de baixo grau (metassedimentares, xistos, filitos, metacalcárias, etc) muito antigas (Proterozoico Superior).

Com as variáveis locais regionalizadas foi possível observar alguns corpos geológicos como os granitoides e as intrusivas alcalinas (declividade e curvatura médias). As rochas metamórficas, no geral, apresentam declividade e curvatura altas, mas não possuem distinção entre si a partir das variáveis apresentadas. Essas características, no entanto, não são suficientes para uma classificação geológica e não correspondem a delimitação dos terrenos geomorfológicos a qual pertencem, por isso não foram consideradas na análise de agrupamento. O Planalto Dissecado de Adrianópolis embora pertença ao Grupo Açungui é composto por um terreno bastante inclinado e com dissecção profunda, vista

pelo relevo relativo, apresentando vertentes mais expressivas. Isto pode ser explicado pela presença de quartzitos.

Os resultados da aplicação do classificador k-médias mostram que é possível caracterizar o relevo a partir do agrupamento sucessivo de unidades de terrenos em níveis hierárquicos, mesmo sem o conhecimento prévio da área.

6 CONCLUSÕES

A segmentação dos dados de orientação na forma de suas componentes ortogonais (seno e cosseno) foi eficaz no delineamento de setores de vertente. A separação de segmentos nos limites verticais do perfil das vertentes (divisores e talvegues) resulta do contraste apresentado por estes dados entre vertentes opostas.

A alteração dos parâmetros de forma e compacidade resulta em efeitos negativos sobre a segmentação de vertentes. Manipulações do parâmetro de tamanho, por sua vez, mostraram-se oportunas para ajustar a extensão horizontal dos segmentos a setores de vertente.

Os setores de vertentes mostraram-se relativamente homogêneos à medida que tivessem sua extensão lateral reduzida, constituindo unidades de terreno que possuem significado topográfico mais particularizado. No entanto, a redução do tamanho mostrou-se limitada por um efeito de supersegmentação das vertentes, quando impossibilita a cobertura de seu perfil completo.

A facilidade de obtenção e os resultados das aplicações mostram que os setores de vertente podem constituir uma unidade de terreno adequada para processos de regionalização em escalas imediatamente mais abrangentes do que aquelas atendidas por janelas móveis. Além da escala mais flexível, permitem uma integração de dados mais estruturada, sem a contaminação entre dados de vertentes distintas, como quando operada em janelas móveis.

A extração de setores de vertentes por segmentação é muito dependente do contraste da orientação entre vertentes distintas. Onde a vertente é bastante expressiva e os limites verticais são bem delimitados há maior liberdade de manipulação do tamanho dos segmentos em relação a regiões mais aplainadas e com topos de morro mais arredondados, onde o limite entre o talvegue e a cumeeira é de difícil definição.

Os atributos regionais e regionalizados com base nos setores de vertentes mostraram-se úteis no agrupamento de setores em unidades de níveis hierárquicos superiores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 2, p. 135-150, 1998.
- ANDERS, N. S.; SEIJMONSBERGEN, A. C.; BOUTEN, W. Segmentation optimization and stratified object-based analysis for semi-automated geomorphological mapping. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, p. 2976-2985, 2011.
- BAATZ, M. M.; SCHÄPE, A. Multiresolution segmentation—an optimization approach for high quality multi-scale image segmentation. In: ANGEWANDTE GEOGRAPHISCHE INFORMATIONSVARBEITUNG, BEITRÄGE ZUM AGIT-SYMPOSIUM SALZBURG, 12, 2000. **Proceedings...** 2000.
- BASEI, M. A.; SIGA JÚNIOR, O.; MACHIAVELLI, A.; MANCINI, F. Evolução tectônica dos terrenos entre os Cinturões Ribeira e Dom Feliciano (PR-SC). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 22, n. 2, p. 216-221, 1992.
- BENZ, U. C. et al. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 58, n. 3/4, p. 239-258, 2004.
- BLASCHKE, T. Object based image analysis for remote sensing. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, n. 1, p. 2-16, 2010.
- BRAMER, M. **Principles of data mining**. London: Springer, 2007.
- CARMAGO, F. F. **Análise orientada ao objeto aplicada ao mapeamento de unidades geomorfológicas a partir de dados ASTER/Terra**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. [S.l.]: Edgard Blucher, 1980.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. [S.l.]: Edgard Blucher, 1974.
- DENT, D.; YOUNG, A. **Soil survey and land evaluation**. [S.l.]: George Allen & Unwin., 1981.
- DERRUAU, M.; PLANS, P. **Geomorfología**. Barcelona: Ariel, 1966.
- DIKAU, R. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: RAPER, J. (Ed.). **Three dimensional applications in geographical information systems**. London: Taylor and Francis, 1989. p. 51– 77.
- DONG, P.; CHEN, Q. **LiDAR remote sensing and applications**. [S.l.]: CRC Press, 2017.

DRAGUT, L.; BLASCHKE, T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. **Geomorphology**, v. 81, n. 3/-4, p. 330-344, 2006.

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

DYLIK, J. **The significance of the slope in geomorphology**. [S.l.]: Société des Sciences et des Lettres de Łódź, 1968.

ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE - ESRI. **ArcGIS desktop: release 10.6**. Redlands, CA: ESRI, 2018.

EVANS, I. S. General geomorphometry, derivations of altitude and descriptive statistics. In: CHORLEY, R. J. (Ed.). **Spatial analysis in geomorphology**. London: Butler & Tanner, 1972. p. 17-90.

EVANS, I. S.; MINÁR, J. A classification of geomorphometric variables. **International Geom-Oorphometry**, p. 105-108, 2011.

FARR, T. G. et al. The shuttle radar topography mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, 2007.

FARR, T. G.; KOBRICK, M. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. **Eos, Transactions American Geophysical Union**, v. 81, n. 48, p. 583-585, 2000.

FERNANDES, P. J. **Dados SRTM e derivados no mapeamento geomorfológico regional**. 2013. 119 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.

GALLANT, J. C., DOWLING, T. I. A multiresolution index of valley bottom flatness for mapping depositional areas. **Water Resources Research**, v. 39, p.1347, 2003.

GARCIA, G. P. B.; GROHMANN, C. H. DEM-based geomorphological mapping and landforms characterization of a tropical karst environment in southeastern Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 93, p. 14-22, 2019.

GEACH, M. R.; STOKES, M.; HART, A. The application of geomorphic indices in terrain analysis for ground engineering practice. **Engineering Geology**, v. 217, p. 122-140, 2017.

GERENTE, J. **Aplicação de variáveis geomorfométricas ao mapeamento de padrões de relevo na Bacia do Rio Itajaí-Açu/SC**. 2018. 131 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2018.

GERRARD, A. J. et al. **Soils and landforms: an integration of geomorphology and pedology**. [S.l.]: George Allen & Unwin, 1981.

HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers & Geosciences**, v. 32, n. 9, p. 1283-1298, 2006.

HOBSON, R. D. Quantitative approach. **Spatial Analysis in Geomorphology**, p. 221, 1972.

INSTITUTO DE TERRAS, CARTOGRAFIA E GEOLOGIA DO PARANÁ. **Mapa geomorfológico do Paraná**. Disponível em: <<http://www.itcg.pr.gov.br/modules/faq/category.php?categoryid=9#>>. Acesso em: jul. 2020.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS – INPE. BRASIL, 2008. **Topodata**: banco de dados geomorfométricos do Brasil. São José dos Campos: INPE, 2008. Disponível em: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/aceso.php>. Acesso em: fev. 2019.

IWAHASHI, J.; PIKE, R.J. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. **Geomorphology**. v.86, p.409–440, 2007.

JET PROPULSION LABORATORY (JPL). NASA, 2017. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm>. Acesso em: jan. 2019.

KOUKOUVELAS, I. K.; ZYGOURI, V.; NIKOLAKOPOULOS, K.; VERROIOS, S. Treatise on the tectonic geomorphology of active faults: the significance of using a universal digital elevation model. **Journal of Structural Geology**, v. 116, p. 241-252, 2018.

KUGLER, H. **Das georelief und seine kartographische Modellierung**. Thesis (PhD) - Universität Halle-Wittenberg, Institut für Geographie, Halle, 1974.

LANE, S. N. Hydraulic modelling in hydrology and geomorphology: a review of high resolution approaches. **Hydrological Processes**, v. 12, n. 8, p. 1131-1150, 1998.

MACMILLAN, R. A.; JONES, R. K.; MCNABB, D. H. Defining a hierarchy of spatial entities for environmental analysis and modeling using digital elevation models (DEMs). **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 28, n. 3, p. 175-200, 2004.

MARK, D. M. Geomorphometric parameters: a review and evaluation. **Geografiska Annales Series A, Physical Geography**, v. 57, n. 3/4, p. 165–177, 1975.

MEIJERINK, A. M. J. Data acquisition and data capture through terrain mapping units. **ITC Journal**, n. 1, p. 23-44, 1988.

MILIAREISIS, G.; ILIOPOULOU, P. Clustering of zagros ranges from the globe DEM representation. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 5, n. 1, p. 17-28, 2004.

MINAR, J.; EVANS, I.S. Elementary forms for land surface segmentation: the theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. **Geomorphology**, v.95, p.236–259, 2008.

MINERAIS DO PARANÁ - MINEROPAR. **Geologia do escudo do Paraná**.

Disponível em:

<http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=23>. Acesso em: fev. 2019.

MINERAIS DO PARANÁ - MINEROPAR. **Mapa geológico do Paraná**. Disponível em:

<http://www.mineropar.pr.gov.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=106>.

Acesso em: fev. 2019.

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v. 5, n. 1, p. 3-30, 1991.

MOREIRA, E. P. **Análise regional da geomorfometria de microbacias hidrográficas**.

2018. 129 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2018.

MUÑOZ, V. A. Espacialização do índice relevo-elevação (E) na bacia do rio Itajaí a partir de MDE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 16., 2013, Foz do Iguaçu (PR). **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013.

MUÑOZ, V. A.; VALERIANO, M. M. Mapeamento da predominância topográfica através do processamento de dados SRTM como contribuição ao mapeamento de solos. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 7., 2008, Belo Horizonte (MG). **Anais...** Belo Horizonte: IAG/UFMG, 2008.

MUÑOZ, V.A.; VALERIANO, M. M. Mapping of floodplain by processing of elevation data from Remote Sensing. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR MATHEMATICAL GEOSCIENCES. **Proceedings...** Berlin: Springer-Verlag, 2013. p. 481-484.

OLAYA, V. Basic land-surface parameters. **Developments in Soil Science**, v. 33, p. 141-169, 2009.

PAUDEL, U.; OGUCHI, T.; HAYAKAWA, Y. Multi-resolution landslide susceptibility analysis using a DEM and random forest. **International Journal of Geosciences**, v. 7, n. 5, p. 726-743, 2016.

PIKE, R. J. Geomorphometry-progress, practice, and prospect. **Zeitschrift für Geomorphologie. Supplementband**, n. 101, p. 221-238, 1995.

PIKE, R. J. The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. **Mathematical Geology**, v. 20, p. 491–512, 1988.

- PIKE, R. J.; WILSON, S. E. Elevation-relief ratio, hypsometric integral and geomorphic area-altitude analysis. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 82, n. 4, p. 1079–1084, 1971.
- PIKE, R. J. Geomorphometry: diversity in quantitative surface analysis. **Progress in Physical Geography**, v.24, n.1, p.1–20, 2000.
- PRIMA, O. D. A. et al. Supervised landform classification of Northeast Honshu from DEM-derived thematic maps. **Geomorphology**, v. 78, n. 3/4, p. 373-386, 2006.
- RABUS, B. et al. The shuttle radar topography mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 57, n. 4, p. 241-262, 2003.
- ROMSTAD, B. Improving relief classification with contextual merging. In: SCANGIS, 2001. **Proceedings...** 2001. p. 3-13.
- ROMSTAD, B.; ETZELMÜLLER, B. Mean-curvature watersheds: a simple method for segmentation of a digital elevation model into terrain units. **Geomorphology**, v. 139, p. 293-302, 2012.
- ROSS, J. L. S. O 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. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 10, p. 41-58, 1996.
- SANTOS, L. J. C. et al. Mapeamento geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 2, 2006.
- SANTOS, L. J. C.; OKA-FIORI, C.; CANALI, N. E.; FIORI, A. P.; DA SILVEIRA, C. T.; DA SILVA, J. M. F.; ROSS, J. L. S. Mapeamento geomorfológico do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 2, 2006.
- SCHMIDT, J.; ANDREW, R. Multi-scale landform characterization. **Area**, v. 37, n. 3, p. 341-350, 2005.
- SHARY, P. A.; SHARAYA, L. S.; MITUSOV, A. V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. **Geoderma**, v. 107, n. 1/2, p. 1-32, 2002.
- 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, 2016.
- STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, n. 11, p. 1117-1142, 1952.
- STROBL, J. Segmentation-based terrain classification. In: ROMSTAD, B. (Ed.). **Advances in digital terrain analysis**. Berlin: Springer, Berlin, 2008. p. 125-139.

TACHIKAWA, T.; KAKU, M.; IWASAKI, A.; GESCH, D.B.; OIMOEN, M.J.;ZHANG, Z.; DANIELSON, J.J.; KRIEGER, T.; CURTIS, B.; HAASE, J.; ABRAMS, M. **ASTER global digital elevation model version 2** - summary of validation results. Washington: NASA, 2011. 27p.

TAGIL, S.; JENNESS, J. GIS-based automated landform classification and topographic, landcover and geologic attributes of landforms around the Yazoren Polje, Turkey. **Journal of Applied Sciences**, v. 8, n. 6, p.910-921, 2008.

TOUTIN, T.; GRAY, L. State-of-the-art of elevation extraction from satellite SAR data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 55, n. 1, p. 13-33, 2000.

TRIMBLE. **eCognition developer**: release 9.0. Munich: Trimble, 2014.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). **What are digital elevation model (DEMs)?** Disponível em: <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-digital-elevation-models-dems>. Acesso em: jan. 2019.

VALERIANO, M. M. **TOPODATA**: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 72p.

VALERIANO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. Derivação de Modelos Digitais de Elevação (MDE) em coordenadas geográficas. In: **SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO**, 18., 2015, João Pessoa (PB). **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2015.

VALERIANO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. **Topodata**: processamento dos dados SRTM. São José dos Campos: INPE, 2010. 79 p. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/37FCH9B>. Acesso em: jan. 2019.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Análise digital do padrão de coerência da orientação de vertentes em terrenos planos. In: **CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO ABEQUA**, 13., 2011. **Anais...** 2011.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Regionalization of local geomorphometric derivations for geological mapping in the sedimentary domain of central Amazônia. **Computers & Geosciences**, v. 100, p. 46-56, 2017.

WENDEL, J.; BUTTENFIELD, B. P.; STANISLAWSKI, L. V. An evaluation of unsupervised and supervised learning algorithms for clustering landscape types in the United States. **Cartography and Geographic Information Science**, v. 43, n. 3, p. 233–249, 26 maio 2016.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. Digital terrain analysis. **Terrain analysis: Principles and Applications**, v. 6, n. 12, p. 1-27, 2000.

WOOD, J. D. The geomorphological characterization of digital elevation models.
1996. 185p. Thesis (Ph.D) - . thesis, University of Leicester, Leicester, UK, 1996.