



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/06.04.14.36-TDI

## **ANÁLISE REGIONAL DA GEOMORFOMETRIA DE MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS**

Eder Paulo Moreira

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Márcio de Morisson Valeriano, aprovada em 29 de junho de 2018.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3R8ES4L>

INPE  
São José dos Campos  
2018

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

**COMISSÃO DO CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO  
DA PRODUÇÃO INTELECTUAL DO INPE (DE/DIR-544):****Presidente:**

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

**Membros:**

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Marcelo de Castro Pazos - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Murilo Luiz Silva Gino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/06.04.14.36-TDI

## **ANÁLISE REGIONAL DA GEOMORFOMETRIA DE MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS**

Eder Paulo Moreira

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr. Márcio de Morisson Valeriano, aprovada em 29 de junho de 2018.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3R8ES4L>

INPE  
São José dos Campos  
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Moreira, Eder Paulo.

M813a Análise regional da geomorfometria de microbacias hidrográficas / Eder Paulo Moreira. – São José dos Campos : INPE, 2018.

xx + 129 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2018/06.04.14.36-TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

Orientador : Dr. Márcio de Morisson Valeriano.

1. Bacias hidrográficas. 2. Mapeamento digital. 3. MDE. 4. Solos. 5. Relevo. I.Título.

CDU 528.8:556.51

---



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): **Eder Paulo Moreira**

Título: "ANÁLISE REGIONAL DA GEOMORFOMETRIA DE MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS".

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

**Sensoriamento Remoto**

Dra. Dilce de Fátima Rossetti

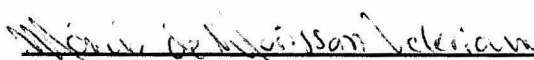


\_\_\_\_\_  
Presidenta / INPE / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Márcio de Morisson Valeriano



\_\_\_\_\_  
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. Camilo Daleles Rennó

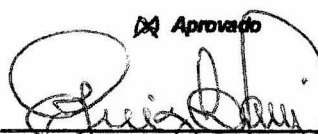


\_\_\_\_\_  
Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dr. João Luiz Lani

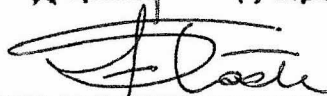


\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / UFRV/DPS / Viçosa - MG

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Dra. Sandra Maria Fonseca da Costa



\_\_\_\_\_  
Convidado(a) / UNIVAP/P&D / São José dos Campos - SP

( ) Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado ( ) Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

( ) maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 29 de Junho de 2018



Todas as verdades são  
fáceis de perceber depois  
de terem sido descobertas;  
o problema é descobri-las.

Galileu Galilei





## AGRADECIMENTOS

Ao INPE, por me acolher e oferecer suas instalações e equipamentos para realização deste trabalho. Ao seu corpo docente pelos ensinamentos técnicos e de vida transmitidos ao longo do doutoramento e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro.

Agradeço, em especial, ao Dr. Márcio de Morisson Valeriano pela orientação, receptividade e conhecimentos compartilhados que me renderam grande aprendizado e permitiram a realização deste estudo.

Aos participantes da Banca Examinadora Dr. Camilo Daleles Rennó (DPI/INPE), Dra. Dilce de Fátima Rossetti (DSR/INPE), Dr. João Luiz Lani (UFV/DPS) e Dra. Sandra Maria Fonseca da Costa (UNIVAP/ IP&D), pelas sábias palavras e sugestões propostas, que contribuíram para melhoria deste trabalho e para o meu aperfeiçoamento científico.

Ao Dr. João Luiz Lani (UFV) por todos os conhecimentos transmitidos, incentivos e pela amizade, que se iniciaram ainda em minha graduação. Ao Dr. Andrew T. Hudak (RMRS/USDA) por ter me apresentado à pesquisa em Sensoriamento Remoto e incentivado a iniciar minha carreira científica.

Ao Dr. Camilo Daleles Rennó (DPI/INPE), Dr. Clovis Angeli Sansigolo (MET/INPE) e Dra. Laura de Simone Borma (CST/INPE) pelos conhecimentos compartilhados durante fases iniciais deste trabalho.

À Dra. Elisabete Caria Moraes e Dra. Ieda Del'Arco Sanches pelo empenho na coordenação do curso (PG-SER) bem como por todos os esclarecimentos prestados quando foram necessários.

Ao André, Malu e Simone da Biblioteca do INPE pelas valiosas ajudas e presteza.

Aos colegas estudantes da PG-SER com os quais tive o prazer de conviver nas salas de aula, no LTID e em diversos momentos de descontração.

À minha família, em especial à minha mãe Maria Catarina, pelo amor e apoio singular em todos os momentos.

À minha esposa Laísa Conde pelo companheirismo e aos seus pais Roberto e Eridan, e avó Édzia, pelo imenso apoio. Em especial agradeço à minha filha Dâmaris, nascida na fase final desta tese, que tem me proporcionado grande alegria.

Sobretudo, sou imensamente grato a Deus pela vida e por me dar a oportunidade de conviver com diversas pessoas especiais que foram mais do que profissionais, familiares ou amigas, souberam compreender minhas fraquezas, limitações e sempre tiveram um ombro para me amparar e uma mão para me ajudar nos momentos difíceis.



## RESUMO

O objetivo dessa pesquisa é analisar o padrão de distribuição de variáveis geomorfométricas de microbacias hidrográficas com vista à caracterização do terreno em escala regional. Para isso foram realizados: (1) a implementação do cálculo de variáveis geomorfométricas de microbacias a partir de modelo digital de elevação (MDE); (2) avaliação das variáveis geomorfométricas de microbacias em multiescala; (3) definição de classes ou regiões homogêneas a partir da distribuição das variáveis; e (4) análise da relação entre as variáveis e diferentes tipos de relevo e solos. A área de estudo compreende o Estado de São Paulo. A partir do MDE (Topodata-SRTM) com resolução espacial de 1 arco-segundo foram delimitadas microbacias hidrográficas (n=530) de ordem 3 a 6 e definido um conjunto de variáveis geomorfométricas (n=74) para caracterização de diversos aspectos de cada microbacia, tais como, forma, relevo e estrutura da drenagem. Análises de redundância e de características ligadas à escala e a distribuição espacial foram importantes para a avaliação e seleção de um número menor de variáveis (n=12). A krigagem dos dados foi realizada para criação de planos de informação contínuos e as respectivas análises geoestatísticas usadas também para o exame do padrão de variabilidade espacial de cada variável selecionada. A definição de regiões geomorfometricamente homogêneas deu-se pela aplicação do método de agrupamento k-médias sob cada plano de informação. A maioria das variáveis geomorfométricas selecionadas permitiu a definição e caracterização de grandes compartimentos (regiões) geomorfométricos na área de estudo. Esses compartimentos, de maneira geral, apresentaram tamanho, localização e valores relacionados com as características das províncias geomorfomológicas e com as principais classes de solos. A densidade de drenagem, integral hipsométrica, índice de rugosidade e comprimento médio dos canais mostraram-se as variáveis de microbacias hidrográficas mais correlacionadas a mapeamentos de relevo e de solos em escalas regionais.

Palavras-chave: Bacias hidrográficas. Mapeamento Digital. MDE. Solos. Relevo.



# **REGIONAL ANALYSIS OF THE GEOMORPHOMETRY OF DRAINAGE BASINS**

## **ABSTRACT**

The objective of this research is to analyze the regional distribution pattern of geomorphometric variables of small drainage basins aiming terrain characterization in a regional (broad) scale. For this purpose were realized (1) the implementation of the calculation of geomorphometric variables of drainage basins using digital elevation model (DEM); (2) multi-scale evaluation of geomorphometric variables of drainage basin; (3) definition of homogeneous classes or regions from the distribution of the geomorphometric variables; and (4) analysis of the relationship between the variables and different terrain types. The study area comprises São Paulo State in Brazil. From the processing of digital elevation model (Topodata-SRTM) with 1 arc second grid, drainage basins (n=530) from 3 to 6 Strahler order were delimited and a set of geomorphometric variables (n = 74) was calculated to characterize several aspects of each sub-basin, such as shape, relief and drainage structure. The redundancy analysis and aspects related to scale-dependency and spatial distribution were important to evaluate the variables and for selection of a smaller number of variables (n = 12). Ordinary kriging was used to create continuous layers and the respective geostatistic analyses were also used for the study of spatial variability of each selected variable. The definition of geomorphometrically homogeneous regions was based on the application k-means clustering on each layer. Most of the geomorphometric variables selected allowed the definition and characterization of large geomorphometric compartments (regions) in the study area. These compartments, in general, presented size, location and values related to the characteristics of the geomorphological provinces and to the main soils types. Drainage density, hypsometric integral, ruggedness number and mean channels length were the geomorphometric variables from drainage with higher correlation to the distribution and characteristics of relief and soils in regional scale.

Keywords: Drainage basin. Digital mapping. DEM. Soil. Terrain.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Classificação dos elementos de relevo de acordo com a curvatura vertical e horizontal.....	7
Figura 2.2 - Estimativa da relação entre tamanho e tempo de existência de uma unidade de relevo .....	8
Figura 2.3 - Ordem dos segmentos de canais conforme vários autores .....	11
Figura 2.4 - Efeito da forma da bacia de drenagem sobre distribuição da vazão (Q) no tempo (t) após a precipitação .....	14
Figura 2.5 - Integral hipsométrica de três paisagens em diferentes estágios de maturidade.....	17
Figura 2.6 - Variação da profundidade média das depressões e da declividade média do fundo do Lago Konigssee com o tamanho da célula.....	19
Figura 2.7 - Processo de regionalização de objetos geomorfométricos .....	21
Figura 2.8 - Efeito do valor do limiar aplicado sobre o fluxo acumulado na rede hidrográfica .....	23
Figura 2.9 - Exemplo de variograma com efeito pepita, alcance e patamar.....	30
Figura 3.1 – Localização, hipsometria e hidrografia geral da área de estudo no Estado de São Paulo, Brasil .....	37
Figura 3.2 - Províncias geomorfológicas do Estado de São Paulo na escala de 1:500.000 .....	38
Figura 3.3 - Fotografias para ilustrar as diferentes províncias geomorfológicas do Estado de São Paulo .....	40
Figura 3.4 - Classes de solos do Estado de São Paulo na escala de 1:500.000 .....	41
Figura 3.5 - Rede hidrográfica básica do Estado de São Paulo.....	43
Figura 4.1 - Fluxograma geral das etapas de processamento e análises aplicadas à área de estudo.....	45
Figura 4.2 - Comparação da rede hidrográfica disponibilizada pela Secretaria do Meio Ambiente (SMA) do Estado de São Paulo com a rede hidrográfica elaborada a partir do MDE-SRTM.....	48

Figura 4.3 - Exutório das 477 microbacias selecionadas no Estado de São Paulo.....	49
Figura 4.4 - Variáveis geomorfológicas primárias e hidrografia de uma das microbacias selecionadas .....	50
Figura 5.1 - Representação geral do MDE (a), transectos (b, c, d, e, f) e visualização em detalhe (g), a partir dos dados Topodata-SRTM para o Estado de São Paulo.....	60
Figura 5.2 - Representação geral do declividade (a), transectos (b, c, d, e, f) e visualização em detalhe (g), a partir dos dados Topodata-SRTM para o Estado de São Paulo .....	61
Figura 5.3 - Representação geral do <i>HAND</i> (a), transectos (b, c, d, e, f) e visualização em detalhe (g), a partir dos dados Topodata-SRTM para o Estado de São Paulo.....	62
Figura 5.4 - Histogramas do MDE, da declividade e do <i>HAND</i> para o Estado de São Paulo.....	63
Figura 5.5 - Rede hidrográfica, visualização geral (a) e em detalhe (b), elaborada a partir dos dados Topodata-SRTM para o Estado de São Paulo .....	64
Figura 5.6 - Frequência (densidade) do logaritmo da área das microbacias selecionadas do Estado de São Paulo para cada ordem Strahler .....	65
Figura 5.7 - Histogramas, média e mediana da variável mH (altura média de todos os pixels em relação ao exutório da microbacia) para as microbacias selecionadas do Estado de São Paulo; sem (a) e com (b) transformação logarítmica.....	66
Figura 5.8 - Relação entre rugosidade (original) e amplitude (a) e entre rugosidade e densidade de drenagem (b) utilizando as microbacias selecionadas do Estado de São Paulo .....	67
Figura 5.9 - Relação entre rugosidade modificada e amplitude, entre rugosidade modificada e <i>HAND</i> médio e entre rugosidade modificada e densidade de drenagem .....	68
Figura 5.10 - Variação do valor médio das variáveis mLS (comprimento médio dos segmentos de drenagem) e Cpc (índice de compactidade) em função da ordem das microbacias .....	69
Figura 5.11 - Correlação (r) das 74 variáveis com a primeira (PC I) e com a segunda (PC II) componentes principais obtidas a partir das microbacias selecionadas do Estado de São Paulo .....	70



Figura 5.12 - Diagrama de dispersão e coeficiente de determinação entre variáveis geomorfológica de microbacias hidrográficas e área das microbacias para as microbacias selecionadas do Estado de São Paulo .....	74
Figura 5.13 - Histograma das variáveis geomorfológicas das microbacias selecionadas do Estado de São Paulo, após as respectivas transformações .....	75
Figura 5.14 - Semivariogramas e seus coeficientes para as diferentes variáveis geomorfológicas de bacias hidrográficas .....	77
Figura 5.15- Distribuição das variáveis geomorfológicas de microbacias interpoladas por krigagem .....	78
Figura 5.16 - Soma total dos quadrados dos desvios dentro das classes em relação ao número de classes para as 12 variáveis geomorfológicas selecionadas do Estado de São Paulo .....	79
Figura 5.17 - Distribuição das classes de cada variável geomorfológica no Estado de São Paulo.....	80
Figura 5.18 - Proporção das ordens das microbacias em cada classe das variáveis geomorfológicas para o Estado de São Paulo .....	81
Figura 5.19 - Microbacias hidrográficas selecionadas para representar as classes da variável geomorfológica fator forma (FF) no Estado de São Paulo .....	82
Figura 5.20 - Microbacias selecionadas para representar a classe da variável geomorfológica densidade de drenagem (DD) no Estado de São Paulo. ....	82
Figura 5.21 - Microbacias selecionadas para representar as classes da variável geomorfológica comprimento médio dos canais (mLS) no Estado de São Paulo.....	82
Figura 5.22 - Microbacias selecionadas para representar as classes da variável geomorfológica integral hipsométrica (Hyp) no Estado de São Paulo ...	83
Figura 5.23 - Províncias geomorfológicas (I, II, III, IV e V), declividade média das microbacias (A) e densidade de drenagem das microbacias (B) do Estado de São Paulo para comparação visual .....	84
Figura 5.24 - Boxplot das diferentes províncias geomorfológicas em relação às variáveis geomorfológicas das microbacias do Estado de São Paulo .....	85
Figura 5.25 - Classes de solos (Oliveira, 1999) e densidade de drenagem das microbacias do Estado de São Paulo para comparação visual .....	86
Figura 5.26 - Boxplot das diferentes classes de solos em relação às variáveis geomorfológicas das microbacias do Estado de São Paulo .....	87

Figura 5.27 - Blocos diagramas elaborados a partir do MDE para representar os diferentes relevos nas cinco províncias geomorfológicas do Estado de São Paulo.....	90
Figura B1 - Matriz de coeficientes de determinação ( $r^2$ ) da regressão linear das variáveis geomorfométricas de microbacias.....	129

## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Categorias de unidades de relevo e suas características.....	5
Tabela 2.2 - Categorias e exemplos de variáveis geomorfométricas .....	9
Tabela 2.3 - Principais variáveis que descrevem forma da bacia hidrográfica .....	15
Tabela 2.4 - Exemplos de estudos de classificação de variáveis geomorfométricas.....	27
Tabela 2.5 - Resumo das principais versões de MDE SRTM e ASTER-GDEM de média resolução espacial disponíveis para todo o território brasileiro .....	36
Tabela 4.1 - Variáveis planimétricas (n=31) elaboradas para as microbacias selecionadas do Estado de São Paulo .....	52
Tabela 4.2 - Variáveis altimétricas (n=43) elaboradas para as microbacias selecionadas do Estado de São Paulo .....	53
Tabela 4.3 - Resumo dos códigos desenvolvidos para processamento das microbacias da área de estudo e geração das variáveis geomorfométricas.....	54
Tabela 5.1 - Organização das variáveis de acordo com o número de coeficiente de determinação ( $r^2$ ) maior ou igual 0,5, sendo o $r^2$ entre pares de variáveis que descrevem as 74 variáveis das microbacias selecionadas do Estado de São Paulo.....	71
Tabela 5.2 - Variáveis geomorfométricas selecionadas dentre as 74 variáveis analisadas .....	72
Tabela 5.3 - Matriz de coeficientes de determinação ( $r^2$ ) das variáveis selecionadas obtida com as microbacias selecionadas do Estado de São Paulo .....	73
Tabela 5.4 - Características gerais das 12 variáveis geomorfométricas selecionadas neste estudo para caracterização de microbacias do Estado de São Paulo.....	88



# SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos.....	2
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>3</b>
2.1 Geomorfometria geral e específica.....	3
2.2 Componentes geomorfométricos fundamentais .....	3
2.3 Estrutura hierárquica dos objetos geomorfométricos .....	5
2.4 Variáveis geomorfométricas.....	8
2.4.1 Variáveis geomorfométricas de bacias hidrográficas.....	10
2.4.1.1 Ordem, número e comprimento dos canais.....	10
2.4.1.2 Área de captação .....	13
2.4.1.3 Concentração de canais .....	13
2.4.1.4 Forma da bacia hidrográfica.....	14
2.4.1.5 Elevação .....	15
2.4.1.6 Relevo.....	16
2.4.1.7 Declividade.....	16
2.4.1.8 Curva hipsométrica .....	17
2.4.1.9 Índice de Rugosidade .....	18
2.5 Especificidades de escala das variáveis geomorfométricas.....	18
2.6 Regionalização de variáveis geomorfométricas .....	20
2.6.1 Obtenção de objetos geomorfométricos de significado hidrológico .....	21
2.6.2 Obtenção de objetos geomorfométricos de significado geomorfológico.....	24
2.6.3 Análise geoestatística e interpolação.....	29
2.7 Geomorfometria aplicada ao mapeamento digital de solos.....	31
2.8 Dados geomorfométricos.....	33
<b>3 ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>37</b>
3.1 Localização.....	37
3.2 Contexto geológico e fisiográfico.....	37
3.3 Solos .....	41

3.4	Recursos Hídricos.....	42
3.5	Clima .....	43
3.6	Uso e cobertura da terra.....	44
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>45</b>
4.1	Plano Geral .....	45
4.2	Dados e recursos de processamento .....	46
4.3	Obtenção da rede hidrográfica e delimitação de microbacias .....	47
4.4	Variáveis geomorfológicas de microbacias.....	50
4.5	Seleção das variáveis geomorfológicas .....	56
4.6	Análise geoestatística e interpolação .....	56
4.7	Classificação das variáveis geomorfológicas .....	57
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>59</b>
5.1	Apresentação das variáveis geomorfológicas primárias e da rede hidrográfica .	59
5.2	Variáveis geomorfológicas de microbacias.....	64
5.2.1	Aspectos gerais.....	65
5.2.2	Padrão geral de redundância e seleção .....	69
5.2.3	Estatísticas das variáveis selecionadas .....	73
5.3	Regionalização das variáveis geomorfológicas.....	76
5.3.1	Análise geoestatística e interpolação.....	76
5.3.2	Classificação das variáveis geomorfológicas.....	78
5.4	Caracterização das províncias geomorfológicas e das classes de solos .....	83
5.5	Considerações gerais .....	87
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>93</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>95</b>
	APÊNDICE A – CÓDIGOS PARA OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS GEOMORFOMÉTRICAS DE MICROBACIAS .....	109
	APÊNDICE B – COEFICIENTES DE DETERMINAÇÃO ( $r^2$ ) DAS VARIÁVEIS GEOMORFOMÉTRICAS DE MICROBACIAS .....	129

## 1 INTRODUÇÃO

Métodos tradicionais de levantamentos de solo e relevo se caracterizam pelo custo elevado, longo tempo de elaboração e alto nível de subjetividade. Essas características refletem na carência de mapeamentos para o território nacional, principalmente em escalas maiores que 1:1000.000. Em contraposição, a disponibilização crescente de novas tecnologias baseadas em sensoriamento remoto, sistemas de informação geográfica (SIG) e processamento automático ou semiautomático de dados favorece a elaboração de mapas com maior nível de exatidão, objetividade e menores custos.

Nas últimas décadas, dados de modelo digital de elevação (MDE) e ferramentas para seu processamento contribuíram para a quantificação de variáveis geomorfométricas locais, como declividade, curvatura e orientação de vertente, bem como caracterização de objetos de caráter hidrológico (por exemplo, delimitação de bacias e obtenção de redes de drenagem digitais) e geomorfológicos (por exemplo, delimitação de unidades de relevo). Mais recentemente, houve avanço significativo desses estudos com a disponibilização gratuita de MDE de cobertura quase global com resolução espacial média (FARR et al., 2007; FUJISADA; URAI; IWASAKI, 2012), projetados para possibilitar mapeamentos na escala até 1:100.000.

A maioria dos esforços de mapeamentos utilizando processamento de MDEs tem se baseado em variáveis geomorfométricas locais (HENGL; ROSSITER, 2003; WIECZOREK; MIGÓN, 2014). Variáveis geomorfométricas regionais têm sido menos exploradas no contexto do geoprocessamento, possivelmente pelo elevado nível de processamento para sua obtenção (SCHMIDT; DIKAU, 1999). São exemplos de variáveis regionais: densidade de drenagem, dimensão interfluvial, amplitude altimétrica e dissecação do relevo, que são comumente utilizadas em mapeamentos de relevo (IPT, 1981; ROSS; MOROZ, 1996) e de classes de solos (OLIVEIRA, 1999) por meio de abordagens de caráter qualitativo ou manual.

Técnicas relativamente recentes permitem a obtenção digital de segmentos (polígono com certa homogeneidade interna) para representar unidades de mapeamento para cálculo das variáveis regionais, classificação e outras aplicações

(ANDERS; SEIJMONSBERGEN; BOUTEN, 2011; MANFRÉ et al., 2015; VALERIANO; ROSSETTI; 2017). À parte desses avanços, a delimitação automática de microbacias representa uma perspectiva semelhante, capaz de fornecer igualmente unidades de mapeamento, porém com a conveniência funcional da adequação a variáveis geomorfométricas específicas de microbacias, como fator forma, densidade de drenagem, integral hipsométrica e índice de rugosidade, que são alvo de estudos fundamentais relacionados a processos hidrológicos (CARLSTON, 1963; GREGORY; WALLING, 1973; KELSON; WELLS, 1989) e à geomorfologia (ARNETT; CONACHER, 1973; AYADI et al., 2010; CHORLEY; KENNEDY, 1971; HORTON, 1945; STRAHLER, 1964). Para avaliar esse potencial, ainda pouco explorado no contexto da geomorfometria, é importante pesquisar essas variáveis sobre conjuntos extensos de resultados possibilitados pelo uso de geoprocessamento - abordagem quantitativa - e analisar seu padrão de distribuição regional. Dessa forma, questões relacionadas à capacidade dessas variáveis na compartimentação regional do relevo poderão ser respondidas com dados e tecnologias de uso corrente.

## **1.1 Objetivos**

O objetivo geral desta pesquisa é analisar o padrão de distribuição regional de variáveis geomorfométricas de microbacias hidrográficas. Os objetivos específicos são:

- a) Desenvolver e implementar o cálculo automatizado de variáveis geomorfométricas de microbacias a partir de MDE;
- b) Avaliar as variáveis geomorfométricas de microbacia em multiescala para caracterização regional do relevo;
- c) Definir regiões homogêneas a partir da classificação geomorfométrica de microbacias;
- d) Analisar a relação entre variáveis geomorfométricas de microbacias e diferentes tipos de relevo e de solos.



## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

O estudo de variáveis geomorfométricas de bacias hidrográficas, regionalização e aplicação requer o conhecimento sobre: (1) conceitos gerais relacionados à geomorfometria, aos componentes geomorfométricos e a questões de escala; (2) variáveis ou atributos geomorfométricos; (3) processo de obtenção de informações regionalizadas a partir de dados geomorfométricos locais; (4) aplicações da geomorfometria no estudo do relevo e dos solos; e (5) dados básicos utilizados em geomorfometria. Esses tópicos são abordados nesse Capítulo nos subitens a seguir.

### **2.1 Geomorfometria geral e específica**

A geomorfometria refere-se à análise quantitativa das características geométricas e topológicas do relevo. Em termos gerais, as características geométricas referem-se à altitude (ou elevação), inclinação, orientação e curvatura, e as características topológicas aos arranjos e relações espaciais das diferentes partes integrantes do relevo. Com os avanços tecnológicos relacionados à ciência computacional e aquisição de dados da superfície da terra, sistema de informação geográfica (SIG) e modelo digital de elevação (MDE) comumente integram os estudos geomorfométricos (EVANS, 1972).

Uma distinção é dada entre geomorfometria geral e geomorfometria específica (EVANS, 2012; SHARY; SHARAYA; MITUSOV, 2002). A primeira analisa as características da superfície contínua, a segunda as unidades discretas da superfície. Assim, geomorfometria geral aplica-se a toda a paisagem, sem considerar limites de unidades menores ou objetos que compõem a paisagem, e a geomorfometria específica visa caracterizar quantitativamente objetos da paisagem, que não necessariamente são contíguos no espaço, como rios, bacias hidrográficas e leques aluviais.

### **2.2 Componentes geomorfométricos fundamentais**

Componentes geomorfométricos consiste em pontos e objetos geomorfométricos (SCHMIDT; DIKAU, 1999). Os pontos geomorfométricos são caracterizados quantitativamente por meio de localização ( $x$  e  $y$ ) e elevação, e também por descritores que levam em consideração sua vizinhança, como declividade e

curvatura. Os objetos geomorfométricos são elementos lineares, bidimensionais ou tridimensionais do relevo, formados pelos pontos geomorfométricos. Estes são caracterizados quantitativamente por descritores regionais, como tamanho, forma, concentração de objetos internos (por exemplo, densidade de drenagem), tendência central e variabilidade de descritores locais (por exemplo, declividade média e desvio padrão da elevação).

O termo unidade de relevo (*landform*) é comumente utilizado como sinônimo de objeto geomorfométrico. No entanto, há concordância que unidade de relevo abrange somente feições discretas do relevo bi e tridimensionais (EVANS, 2012b; MACMILLAN; SHARY, 2009; MARK; SMITH, 2004). Portanto, considera-se que as unidades de relevo pertencem a um grupo especial de objetos geomorfométricos, no qual feições lineares (por exemplo, linhas de cumeeira e rios) e pontuais (por exemplo, picos e poços) não são incluídas.

As unidades de relevo se diferenciam umas das outras em termos de características, como forma, tamanho, orientação, inclinação e posição. Elas também se diferenciam quanto aos processos físicos que estão envolvidos em sua formação (PIKE, 2002). Segundo Deng (2007) as unidades de relevo podem se enquadrar em cinco categorias: (1) objetos *bona fide*; (2) objetos protótipos; (3) objetos semânticos ou *fiat*; (4) classes de relevo; (5) objetos multiescala. Essa distinção em categorias contribui para a sistematização das unidades de relevo. Uma descrição resumida dessas categorias encontra-se na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Categorias de unidades de relevo e suas características

<b>Categoria</b>	<b>Características</b>	<b>Exemplos</b>
Objetos <i>bona fide</i>	Facilmente distinguível e de pouca dependência de definições para seu reconhecimento	Bacia hidrográfica, canais de drenagem, escarpa, colina, megaleque
Objetos protótipos	Utiliza objetos <i>bona fide</i> como referência absoluta	Topo de morro, fundo de vale, cabeceira da bacia
Objetos semânticos ou objetos <i>fiat</i>	Definido com base em limiares ou critérios subjetivos	Declividade alta, concavidade baixa, vertentes com orientação entre 45 e 90 graus
Classes de relevo	Definida com base em características estatísticas (qualitativa ou quantitativa) dos dados que a representa	Áreas elevadas convexas, regiões com alta densidade de drenagem, domínio de relevo de amplitudes elevadas
Objetos multiescala	Possui de maneira explícita, ou implícita a definição de escala em sua legenda	Bacia de primeira ordem, <i>peakness</i> (regiões de pico definidas com base em vários limiares (DENG; WILSON, 2008), índice de vale (níveis relacionados com o grau de associação com o vale (SCHMIDT; HEWITT, 2004)

Fonte: Adaptado de Deng (2007).

### 2.3 Estrutura hierárquica dos objetos geomorfométricos










A formação do relevo decorre de uma série de processos endógenéticos, como tectonismo (local, regional e global) e vulcanismo, e de processos exógenéticos, que se dão principalmente pela atuação da água, da temperatura, do gelo, dos ventos, e dos agentes biológicos ao longo do tempo geológico. As características do relevo tendem a refletir fatores de maior efeito em sua formação, sendo assim possível estabelecer diversas relações entre características do relevo (forma) e processos de formação com base na comparação de entre processos atuais e passados (HOVIUS, 1996; MOGLEN; ELTAHIR; BRAS, 1998; MONTGOMERY; DIETRICH, 1988; PRICE, 2011; ROSSETTI; VALERIANO, 2007).

Processos de formação do relevo variam em importância de acordo com a escala de observação e contexto geográfico, o que afeta a observação das relações forma-processo, forma-forma, processo-processo. Por exemplo, numa área de grande extensão (escala regional) a precipitação pode ser afetar predominantemente a variação de vazão dos rios e erosão dos solos, enquanto que, numa área de menor extensão (escala de detalhe), onde a precipitação é homogênea, o tipo de substrato

rochoso pode assumir papel de maior relevância. No terço superior de uma bacia hidrográfica (contexto geográfico I) remoção causada por erosão normalmente é mais intensa que deposição. Já no terço inferior da bacia (contexto geográfico II) pode ocorrer o contrário (WILSON; GALLANT, 2000).

Com objetivo de sistematizar o estudo do relevo, particularmente dos seus aspectos geomorfométricos, foram estabelecidas as seguintes tipologias hierárquicas com base na forma e no tamanho (RASEMANN et al., 2004): faceta, elemento de relevo, formas de relevo e associação de formas ou padrões de relevo. Facetas são áreas de pequena extensão e possuem declividade e orientação de vertentes homogêneas. Elementos de relevo consistem em áreas com curvatura vertical e horizontal homogêneas mas podem ter variações na declividade. Conforme DIKAU (1989), os elementos de relevo podem ser divididos em nove classes de acordo com suas curvaturas (Figura 2.1). Formas de relevo são unidades maiores que as anteriores, que apresentam alguma morfologia particular, geralmente herdada dos processos de formação. Como exemplo de formas de relevo pode-se citar deltas, escarpas, dolinas, vales, leques aluviais e bacias hidrográficas. Associação de formas de relevo é definida quando estas assumem certo padrão, seja ele definido pela altimetria ou por alguma outra característica geomorfométrica (por exemplo, inclinação e amplitude). Exemplos de associação de formas de relevo são as planícies, formadas por um conjunto de formas de relevo planas ou suavemente onduladas, e os tabuleiros e chapadas, que são conjuntos de formas de relevo de topo plano. Essas definições de formas de relevo e de associações de formas de relevo se assemelham às representações de formas de relevo das unidades geomorfológicas do IBGE (2003), respectivamente.

Figura 2.1 - Classificação dos elementos de relevo de acordo com a curvatura vertical e horizontal

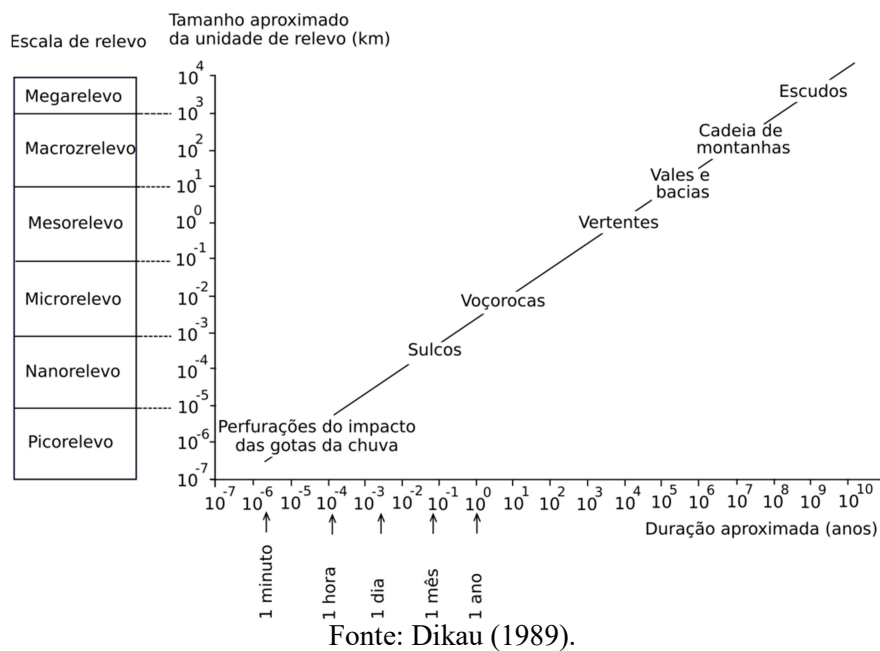
		Curvatura vertical		
		Convexa	Reta	Côncava
Curvatura horizontal	Convexa			
	Reta			
	Côncava			

X: Convexa; R: Reta; e C: Côncava.

Fonte: Dikau (1989).

Unidades de relevo podem ser hierarquizadas no tempo e espaço assumindo que unidades maiores são mais antigas que unidades menores (Figura 2.2). Portanto, estruturas de unidades superiores se sobrepõem às estruturas das unidades subordinadas no espaço e no tempo. O espaço define escalas de relevo variando de picorelevo, com extensão de 0,1 mm a 1 cm, a megarelevo, acima de 1.000 km de extensão. O tempo varia de frações de segundos, tempo para formar uma pequena cratera pela gota da chuva, a bilhões de anos, que é a idade aproximada de um escudo do Pré-Cambriano.

Figura 2.2 - Estimativa da relação entre tamanho e tempo de existência de uma unidade de relevo



## 2.4 Variáveis geomorfológicas

Variáveis geomorfológicas são descritores da superfície topográfica, incluindo seus diversos compartimentos ou unidades, que podem ser subdivididas em locais e não locais. As variáveis locais são determinadas pela análise da vizinhança imediata do ponto geomorfológico (ou pixel) a ser caracterizado, numa extensão suficiente apenas para que se permita a percepção da conformação tridimensional da superfície naquele local (VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010). Em SIG, essas variáveis comumente são calculadas com base no MDE por meio de janelas móveis com tamanho fixo de 3x3, 5x5 pixels, ou maiores. Seus valores variam para cada pixel do *raster* (ou imagem). Entre as variáveis locais mais comuns estão: elevação; declividade; curvatura vertical; curvatura horizontal; e orientação de vertente.

Variáveis não locais são determinadas pela análise de vizinhança ou território de maior abrangência em relação ao ponto em questão. Geralmente elas são elaboradas com base na análise das variáveis locais. Essas variáveis podem ser determinadas para cada ponto ou pixel ou representar regiões ou objetos geomorfológicos. São exemplos de variáveis não locais: comprimento de rampa,

área de captação, direção de fluxo, fluxo acumulado e densidade de drenagem (FLORINSKY, 2016).

Variáveis geomorfométricas também podem ser agrupadas em primária e representativa (SCHMIDT; DIKAU, 1999). A variável primária é determinada para cada pixel do *raster*. Ela pode ser simples, complexa ou composta. A variável primária simples é semelhante à variável local, determinada para cada pixel utilizando janela móvel de tamanho limitado. A variável primária complexa é também determinada para cada pixel, no entanto com a análise dos pixels da imagem sem a restrição de tamanho da vizinhança imposta por janela móvel. A variável primária composta é resultante da combinação de duas variáveis primárias. A variável representativa é determinada para objetos geomorfométricos, como rios e bacias hidrográficas. Exemplos de variáveis de cada uma dessas categorias são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Categorias e exemplos de variáveis geomorfométricas

Variável geomorfométrica	Fonte
<b>Primária simples</b>	
Declividade	Valeriano (2008)
Curvatura vertical	Valeriano (2008)
Curvatura horizontal	Valeriano (2008)
Orientação de vertente	Valeriano (2008)
<b>Primária complexa</b>	
Área de captação específica	Gallant e Hutchinson (2011)
<i>HAND: Height Above the Nearest Drainage</i>	Rennó et al. (2008)
Área de dispersão	Florinsky (2016)
<b>Primária composta</b>	
Índice de umidade	Moore et al. (1991)
Ângulo de incidência solar na superfície	Dubayah e Rich (1995)
Índice de velocidade do escoamento superficial	Horton (1945)
Índice topográfico	Beven e Kirkby (1979)
<b>Representativa</b>	
Área e perímetro de objetos bidimensionais (por exemplo, área de	Band (1986)
Comprimento de objetos lineares (ex.: comp. médio dos rios)	Horton (1945)
Variabilidade interna dos objetos (ex.: índice de rugosidade)	Melton (1957)
Integral hipsométrica	Langbein (1947)
Medidas de concentração (ex.: densidade de drenagem)	Horton (1945)

Fonte: Produção do autor.

### **2.4.1 Variáveis geomorfométricas de bacias hidrográficas**

A bacia hidrográfica é um sistema geomórfico que representa a convergência de um conjunto de canais e sub-bacias delimitado por divisores de água. Esse sistema também representa a convergência e a interação entre a atmosfera, os processos de superfície e subsuperfície, relevo, solos e substrato geológico (BAND et al., 2000). Considerada um sistema aberto, a bacia importa e exporta energia e massa, transformando-as e mantendo o sistema em operação. A superfície da bacia é a área de importação/captação de água proveniente da precipitação. O exutório é por onde a água e os materiais fornecidos deixam o sistema (STRAHLER, 1957).

A bacia hidrográfica é um dos objetos geomorfométricos mais estudados. Os estudos de Horton (1945), Langbein (1947) e Strahler (1957) foram pioneiros na sua caracterização quantitativa. A partir de suas iniciativas, várias relações estatísticas entre variáveis geomorfométricas e informações geomorfológicas e hidrológicas foram estabelecidas. A seguir, serão apresentadas algumas variáveis geomorfométricas de bacias hidrográficas para caracterização dos seus diferentes aspectos, isto é, forma, tamanho, drenagem e relevo. Essas variáveis podem ser organizadas em dois grupos: planimétricas (Subitens 2.4.1.1 a 2.4.1.4) e altimétrica (Subitens 2.4.1.5 a 2.4.1.9). As primeiras são calculadas sem considerar a elevação, e as segundas são calculadas com base na elevação.

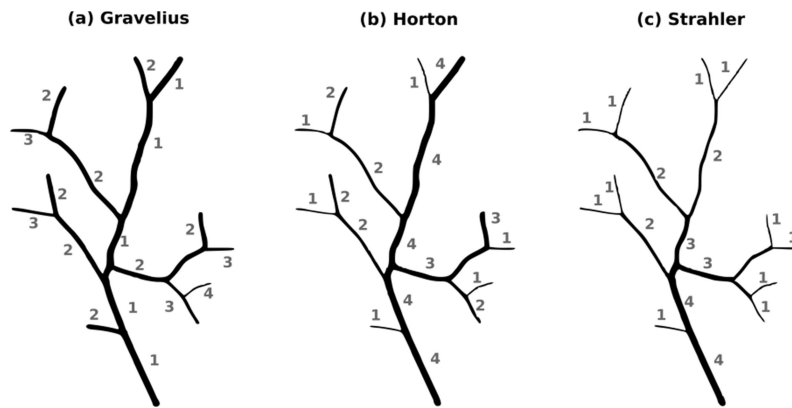
#### **2.4.1.1 Ordem, número e comprimento dos canais**

Nesse estudo apresentam-se os três principais sistemas de designação de ordens de canais de bacias hidrográficas. O mais antigo, definido na Europa por Gravelius (1914), o canal principal da bacia hidrográfica recebe o valor 1. Subsequentemente, todos os canais principais das sub-bacias que drenam diretamente para o canal principal recebe valor 2, e assim por diante. Os canais que não possuem nenhum tributário recebem o valor de ordem mais elevado. Os canais principais são sempre os mais longos (Figura 2.3-a). A utilidade desse sistema se dá principalmente por permitir a distinção do canal principal em relação aos demais canais. Além disso, todos os canais e sub-bacias ligadas ao canal principal recebem o mesmo valor, podendo ser prontamente extraídos e caracterizados separadamente. Uma das desvantagens desse método é que sub-



bacias de mesma ordem podem possuir variação muito alta em termos de área e números de canais.

Figura 2.3 - Ordem dos segmentos de canais conforme vários autores



Onde, (a) Gravelius (1914), (b) Horton (1945) e (c) Strahler (1964).  
Fonte: Jasiewicz et al. (2015).

O segundo sistema foi proposto por Horton (1945) e, o contrário do anterior, designa ordem mais elevada ao canal principal e ordem 1 a todos os canais que não possuem tributários (Figura 2.3-b). Todos os canais de ordem 2 possuem tributário(s) somente de ordem 1. Todos os canais de ordem 3 possuem um ou mais tributários de ordem 2, mas também podem receber tributários de ordem 1. Os canais de ordem 4, ou quarta ordem, recebem tributários de ordem 3 e normalmente de ordens menores. As regras para determinar em uma bifurcação qual é o canal principal e qual é o canal tributário a montante são as seguintes:

- (1) Estender o canal a jusante da bifurcação para a montante da bifurcação seguindo a mesma direção e o canal que possuir o menor ângulo com o canal estendido é o canal principal (com ordem maior);
- (2) Se os dois canais a montante da bifurcação possuem o mesmo ângulo com o canal estendido, o canal mais longo é o canal principal.

No sistema de designação de ordens de Horton (1945), há relação entre o valor da ordem e o número e o comprimento dos canais, daí derivam as leis de composição dos canais:

- (1) Lei do número de canais: O número de canais de diferentes ordens em uma dada bacia tende a ser inversamente proporcional ao índice de bifurcação ( $r_b$ ):

$$r_b = N_o^{1/(s-o)} \quad 2.1$$

Onde,  $N_o$  é o número de canais de ordem  $o$  e  $s$  é a ordem do canal principal.

- (2) Lei do comprimento dos canais: o comprimento médio dos canais de diferentes ordens de uma bacia hidrográfica tende a ser diretamente proporcional à ordem dos canais.

Em áreas com forte controle tectônico, essas leis não são necessariamente aplicáveis, já que a tectônica tem forte influência sobre a direção dos canais e, conseqüentemente, na determinação dos canais principais e dos tributários.

O terceiro sistema, hoje o mais utilizado, é o proposto por Strahler (1964). Nesse sistema, os segmentos de canais que não possuem afluente são de primeira ordem (ordem 1). Onde dois segmentos de canais de primeira ordem se juntam, um canal de segunda ordem se forma. Nas bifurcações onde dois segmentos de canais de segunda ordem se juntam, é formado um canal de terceira ordem; e assim por diante. O segmento de canal de passagem de todo o fluxo de água e sedimentos da bacia hidrográfica é o canal de ordem mais elevada. Nesse sistema, considerando um grande número de canais pertencentes a diferentes bacias hidrográficas, o valor da ordem da bacia é o valor da ordem do canal de maior ordem. Esta ordem é diretamente proporcional ao número e comprimento total de canais e à área das bacias (Figura 2.3-c).

As leis do número de canais e do comprimento dos canais de Horton (1945) são também aplicáveis no sistema de Strahler (1964), com uma diferença na definição do índice de bifurcação ( $R_b$ ):

$$R_b = \frac{N_u}{N_{u+1}} \quad 2.2$$

Onde  $N_u$  é o número de segmentos de canais de ordem  $u$ . Essa definição é mais simples que a da Equação 2.1 por não ter o termo do canal principal.

Segundo Strahler (1964), o índice de bifurcação varia de 3 a 5 em bacias onde a estrutura geológica não influencia fortemente o padrão de drenagem. Valores elevados de índice de bifurcação são esperados em bacias com forma alongada.

Além do índice de bifurcação, uma série de variáveis planimétricas consideradas importantes na caracterização geomorfométrica de bacias hidrográficas pode ser estabelecida pela ordem, número e comprimento dos canais, e suas combinações. Entre elas, pode-se citar: o número e o comprimento total de canais, comprimento médio de canais de determinada(s) ordem(s), e comprimento do canal principal (PRICE et al., 2011; WARNER et al., 2003).

#### **2.4.1.2 Área de captação**

A área de captação ou área da bacia hidrográfica é definida como a área total projetada no plano horizontal que contribui com escoamento superficial para seus canais de diferentes ordens. A área de captação é uma variável que está relacionada diretamente com a quantidade e comprimento total de canais, e com a produção de água e sedimentos na bacia hidrográfica (STRAHLER, 1957).

#### **2.4.1.3 Concentração de canais**

A concentração de canais pode ser calculada de duas formas: (1) pela razão entre o número total de segmentos de drenagem e a área de captação e (2) pela razão entre comprimento total da drenagem e área de captação. A primeira (1) é chamada de densidade de segmentos de drenagem e a segunda (2) de densidade de drenagem. Ambas as variáveis descrevem a concentração da rede de drenagem e sua textura, mas estão relacionadas a diferentes aspectos. Hipoteticamente, alta densidade de drenagem pode ocorrer em áreas com alta ou baixa densidade de segmentos de drenagem. O segundo caso ocorre onde, apesar da baixa densidade de segmentos, seus comprimentos são elevados.

Em geral, baixa densidade de drenagem está relacionada com substrato permeável e relevo plano ou suave ondulado. Alta densidade de drenagem está relacionada com substrato pouco permeável, terrenos montanhosos e regiões com elevados índices de precipitação (MELTON, 1957; STRAHLER, 1964). Relações significativas foram encontradas entre densidade de drenagem e as seguintes variáveis: precipitação média anual (ABRAHAMS; PONCZYNSKI, 1984;

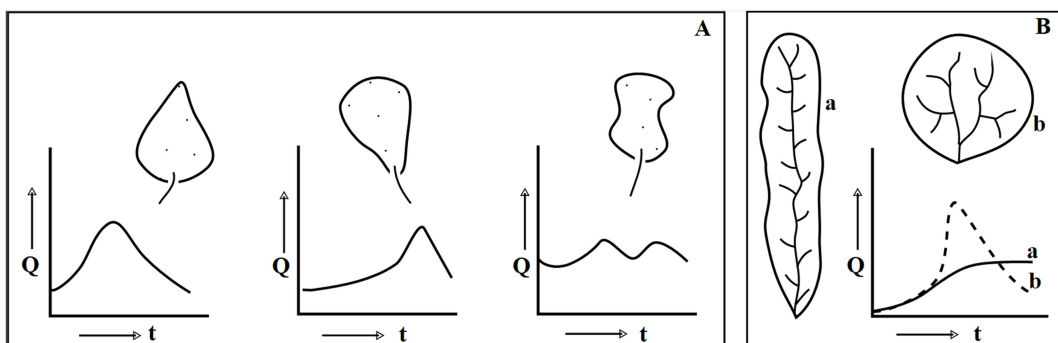
MOGLEN; ELTAHIR; BRAS, 1998; SANGIREDDY et al., 2016), vazão (CARLSTON, 1963; GREGORY; WALLING, 1968b; PALLARD; CASTELLARIN; MONTANARI, 2009) e características do substrato (CHORLEY; KENNEDY, 1971; MELTON, 1957; OGUCHI, 1997).

#### 2.4.1.4 Forma da bacia hidrográfica

A forma da bacia hidrográfica descreve o seu contorno quando projetada no plano horizontal. A forma da bacia é influenciada principalmente por fatores geológicos, como o tipo de rocha, soerguimento, subsidência e fraturamento (SARP; TOPRAK; DUZGUN, 2013). Em áreas tectonicamente estáveis, esperam-se bacias no formato de pera ou oval. Horton (1941), a partir da análise geomorfométrica de várias bacias de grandes rios, conclui que bacias em forma de pera resultam de processos de erosão laminar sobre terreno inicialmente plano e ligeiramente inclinado.

A forma da bacia afeta a distribuição da vazão e a produção de sedimentos ao longo do tempo (Figura 2.4 - A). Bacias circulares tendem a propiciar picos de vazão maiores. Por outro lado, bacias alongadas propiciam menores picos de vazão, porém mais duradouros (Figura 2.4 - B).

Figura 2.4 - Efeito da forma da bacia de drenagem sobre distribuição da vazão (Q) no tempo (t) após a precipitação



A: Comparação do efeito de três formas por meio de três gráficos individuais; e B: comparação de duas formas genéricas em um único gráfico.

Fonte: Schumm (1956).

A forma pode ser medida quantitativamente por diversos índices. Os mais comuns incluem o coeficiente de compacidade, o fator forma, o índice de circularidade, a

razão de alongação e a razão Lemninscate, cujas equações e fontes bibliográficas estão especificadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Principais variáveis que descrevem forma da bacia hidrográfica

Índice	Fórmula	Fonte
Coefficiente de compacidade	$\frac{P}{2\sqrt{\pi A}}$	Gravelius (1914)
Fator forma	$\frac{A}{L^2}$	Horton (1932)
Índice de circularidade	$\frac{4\pi A}{P^2}$	Miller (1953)
Razão de alongação	$2\sqrt{A/\pi}$	Schumm (1956)
Razão Lemninscate	$\frac{L}{4A}$	Chorley (1957)

A: área da bacia; L: comprimento da bacia; e P: perímetro da bacia.

Fonte: Produção do autor.

#### 2.4.1.5 Elevação

A forma mais simples de caracterizar uma bacia de drenagem é por meio de sua elevação, definida como altura em relação ao nível do mar. A elevação pode ser obtida diretamente pelos valores MDE a partir de um único ponto ou pixel, ou a partir de um conjunto de pixel da bacia hidrográfica. Normalmente o uso de apenas um ponto ou cota altimétrica não é suficiente para representar a altitude da bacia de drenagem. Para isso, se faz uso de outras medidas descritivas que dependem da análise de todo o conjunto de valores altimétricos ao longo da bacia, por meio da média, mediana, mínimo, máximo, valores percentílicos, etc.

A elevação é uma variável que possui influencia sobre a precipitação e a temperatura. A temperatura diminui com a altitude, numa taxa, estimada para regiões tropicais, de 0,4 a 0,8 °C a cada 100 m de altitude (BÖHNER; ANTONIC, 2009). Alta altitude também está associada à alta precipitação devido à presença de chuvas orográficas (PIDWIRNY, 2006). Zavoianu (1985) verificou uma correlação significativa entre altitude e vazão média de microbacias, a qual foi explicada pelo aumento da precipitação com a altitude.

#### **2.4.1.6 Relevo**

A elevação, por ser uma medida de altura em relação ao nível do mar, não expressa as características de relevo da bacia. Diversas variáveis foram propostas com esta finalidade. A mais simples é a amplitude, definida como a diferença entre a cota altimétrica máxima e mínima da bacia. Apesar da amplitude ser bastante empregada em diversos estudos, ela não é a forma mais apropriada para representar todo o relevo em bacias hidrográficas, por se basear em apenas dois valores extremos (CHISTOFOLETTI, 1980). Nesse aspecto, medidas de tendência central, como a altura média (altura em relação ao exutório), percentis ou desvio padrão da altura são mais recomendados (EVAN, 1972).

Variáveis que representam o relevo, como as citadas acima, e a declividade, são as características mais perceptíveis e as mais úteis para discriminar diferentes tipos de terrenos. Essas variáveis afetam diretamente os processos de escoamento e infiltração de água na superfície que, por sua vez, estão diretamente ligados aos processos de erosão e de formação de solos. Considerando a influência de outros fatores homogênea, as taxas de transporte de água, e de remoção e transporte de sedimentos, são maiores em ambientes com elevada variação de relevo. Por outro lado, em ambientes de pouca variação de relevo, tendem a prevalecer baixos níveis transporte e remoção e altos níveis de acúmulo de água e sedimentos (GREGORY; WALLING, 1973; SCHUMM, 1956).

#### **2.4.1.7 Declividade**

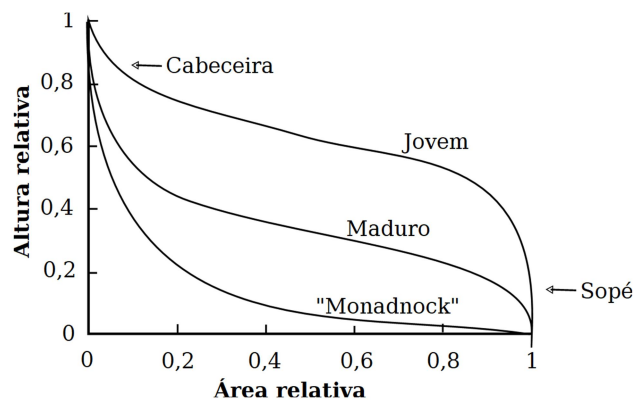
A declividade é também uma forma de expressar o relevo, no entanto sua forma de ser estimada em geomorfometria difere das variáveis descritas anteriormente. A declividade de uma bacia hidrográfica expressa a inclinação geral de sua superfície. Uma forma simples de estimar a declividade é por meio da razão entre amplitude altimétrica e máximo comprimento horizontal da bacia de drenagem (MILLER, 1953). Mais comumente a declividade é obtida a partir da média da declividade de todos os pixels da bacia hidrográfica, denominada de declividade média (PRICE et al., 2011). Ela também pode ser estimada para compartimentos específicos da bacia hidrográfica, como os topos de morro, as vertentes, os vales e a drenagem. Além disso, ela pode ser calculada para as diferentes ordens da

drenagem e para o canal principal por meio da razão entre amplitude altimétrica do canal e seu comprimento.

#### 2.4.1.8 Curva hipsométrica

A curva hipsométrica é uma curva que relaciona elevação e área, na qual a área é representada na forma de frequências acumuladas da elevação (Figura 2.5). A elevação é apresentada no eixo  $y$  e a área no eixo  $x$ . Normalmente a elevação é dada em elevação relativa, que é a razão entre elevação do pixel e elevação máxima da área. A área também é representada como área relativa, definida como a razão entre área total que está acima elevação do pixel e área da bacia (ZAVOIANU, 1985). De acordo com Strahler (1964), o formato da curva hipsométrica indica o estágio de maturidade da paisagem (Figura 2.5).

Figura 2.5 - Integral hipsométrica de três paisagens em diferentes estágios de maturidade



“Monadnock” representa áreas de relevo plano com presença de morros isolados resistentes ao intemperismo.

Fonte: Strahler (1964).

A partir da curva hipsométrica é determinada a integral hipsométrica, definida pela área abaixo da curva. Em geral, valor de integral alto e curva convexa sugerem terreno alto-predominante e pouco dissecado. Por outro lado, valor de integral baixo e curva hipsométrica retilínea a côncava indicam terreno baixo-predominante e dissecação elevada (LANGBEIN, 1947; MUÑOZ, 2009). Diversos autores utilizaram a curva hipsométrica para várias aplicações, tais como discriminação de unidades geológicas (ANDRADES FILHO; ROSSETTI; ZANI, 2011), caracterização de atividades tectônicas (AZOR; KELLER; YEATS, 2002;

CHEN; SUNG; CHENG, 2003) e de processos de erosão (MASEK et al., 1994), e para estudo da influência litológica no relevo (HURTREZ; LUCAZEAU, 1999).

#### **2.4.1.9 Índice de Rugosidade**

O índice de rugosidade da bacia hidrográfica é determinado pelo produto de duas variáveis geomorfológicas, amplitude altimétrica e densidade de drenagem com ambas variáveis nas mesmas unidades de medida (STRAHLER, 1964). É uma variável adimensional, pois a densidade de drenagem tem unidade de comprimento elevado à primeira potência negativa e a amplitude tem unidade de comprimento elevado à primeira potência positiva. Alto índice de rugosidade é esperado em terrenos com grande variação na vertical e com canais (de drenagem) adjacentes poucos distantes considerando o plano horizontal. Baixo índice de rugosidade é esperado em terrenos com baixa variação na vertical e canais de drenagem espaçados por grandes interflúvios.

A capacidade da fórmula acima em expressar a rugosidade de diferentes bacias hidrográficas ainda foi pouco avaliada. Com exceção dos estudos precursores de Melton (1957) e Strahler (1964), os estudos que utilizam o índice de rugosidade são baseados na análise geomorfológica de uma única bacia hidrográfica. Ao considerar que a capacidade da amplitude em representar a variação altimétrica é limitada, recomenda-se que outras variáveis alternativas sejam testadas, como a altura média (altura em relação ao exutório) ou descritores formados a partir da altura em relação à drenagem mais próxima - *HAND* (*HAND* médio) (RENNÓ et al., 2008).

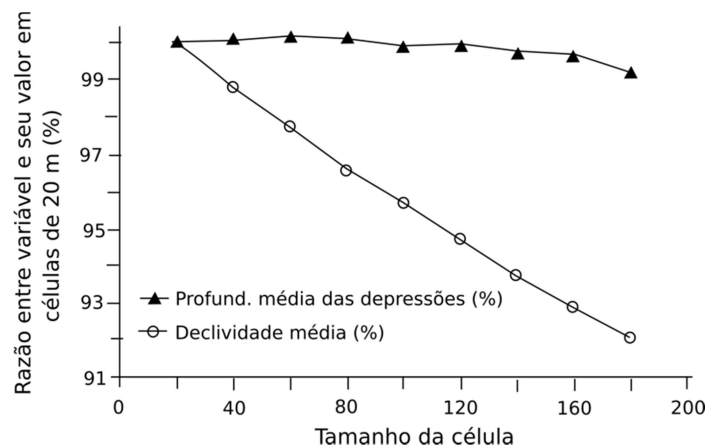
### **2.5 Especificidades de escala das variáveis geomorfológicas**

A dependência de escala, ou a variação de determinadas variáveis geomorfológicas locais com o tamanho das unidades (pixels ou objetos) para as quais são estimadas, é notória na geomorfometria (SHARY; SHARAYA; MITUSOV, 2002). A declividade local, por exemplo, diminui com a diminuição da resolução do MDE (GROHMANN, 2015; ZHANG et al., 1999). Além da declividade local, outras variáveis possuem dependência em relação à escala, como a orientação de vertente, a amplitude, entre outras (EVAN, 1972; ZHANG; MONTGOMERY, 1994). No entanto, conforme revisto por Shary et al. (2002),



nem todas as variáveis geomorfométricas são dependentes da escala. A profundidade média das depressões do fundo do Lago *Konigssee* mostrou-se pouco sensível a variação de escala, o mesmo não ocorreu para a declividade média do fundo do lago (Figura 2.6).

Figura 2.6 - Variação da profundidade média das depressões e da declividade média do fundo do Lago *Konigssee* com o tamanho da célula



Fonte: Adaptado de Shary et al. (2002).

Uma vez obtida a distribuição espacial das variáveis geomorfométricas locais, é possível a regionalização destas com a obtenção de objetos geomorfométricos e sua caracterização por meio de variáveis geomorfométricas específicas. Os objetos geomorfométricos normalmente variam em termos de comprimento, largura, forma, entre outros aspectos. Em particular, a variação de tamanho dos objetos pode afetar diretamente os valores de suas variáveis geomorfométricas, semelhantemente ao efeito da resolução espacial sobre as variáveis locais. A intensidade desse efeito pode ser diferente dependendo da variável geomorfométrica e da amplitude de variação do tamanho dos objetos (EVAN, 1972).

Quando se comparam objetos de diferentes tamanhos por meio de variáveis geomorfométricas, a análise de dependência da escala se faz necessária para apresentar o quanto da variabilidade dos dados ocorre em função da variação de escala. Objetos de diferentes tamanhos podem ser comparados entre si utilizando determinada variável se ela não varia consideravelmente com o tamanho desses objetos. A dependência em relação à escala é comumente determinada utilizando análise de regressão entre a variável em questão e a área dos objetos ou plotando

os valores da variável em relação ao tamanho do objeto (CHOW; HODGSON, 2009; ZHANG; MONTGOMERY, 1994).

## **2.6 Regionalização de variáveis geomorfométricas**

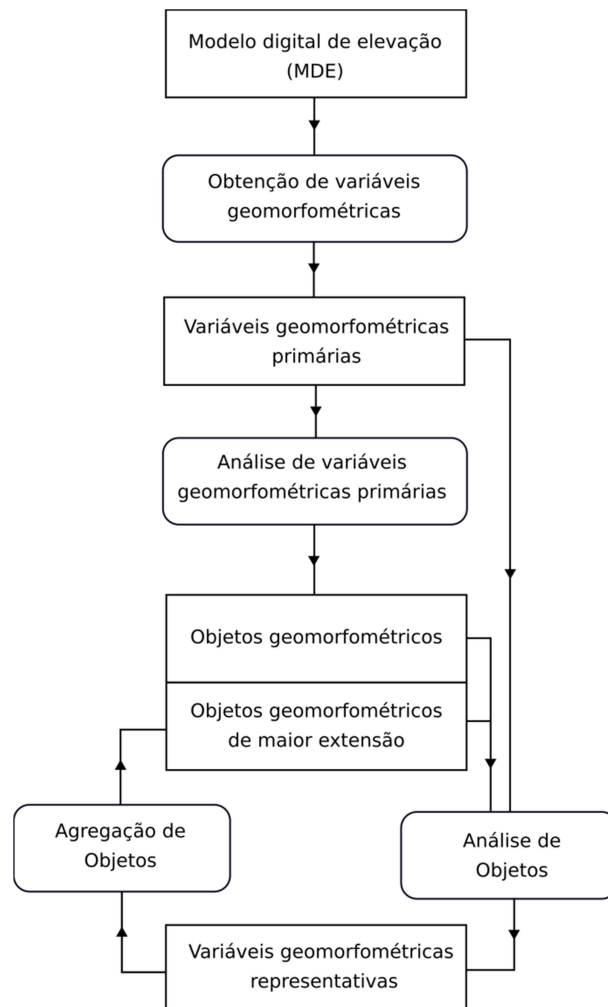
No contexto da geomorfometria, a regionalização refere-se ao processo de transformação de variáveis, pontos e objetos geomorfométricos da escala local para a regional (RASEMANN et al., 2004). O processo de regionalização se inicia pela agregação ou agrupamento de pontos geomorfométricos com o propósito de formarem regiões, ou objetos, que podem ser novamente agregados em objetos geomorfométricos de maior extensão. A agregação se dá com base em critérios de homogeneidade ou limiares que definem uma estrutura com algum significado, por exemplo, hidrológico ou geomorfológico, como microbacias. Nesse processo, ao passar da escala local para a regional, há uma mudança de significado e de interrelações entre as variáveis geomorfométricas (Figura 2.7): Valeriano e Rossetti (2017) observaram que a declividade regionalizada no relevo sedimentar da Amazônia central expressou a intensidade da dissecação fluvial, e não a inclinação das unidades de terreno em si ou mesmo das incisões fluviais presentes. Além disso, variáveis localmente independentes (declividade, curvatura e amplitude) tornaram-se altamente correlacionadas na forma regionalizada.

A regionalização se viabiliza devido à configuração hierárquica do relevo, onde geralmente objetos maiores constituem um arranjo contíguo de objetos menores subordinados (Subitem 2.3). O processo de regionalização envolve 5 níveis conceituais: (1) Objeto no espaço real; (2) Modelo mental/conceitual do objeto; (3) Transferência/abstração para modelos digitais; (4) Operacionalização; e (5) Visualização.

Esses diferentes níveis conceituais denotam que a representação do objeto real passa primeiramente por um modelo conceitual para defini-lo em termos de forma, textura e tamanho. Posteriormente, o modelo conceitual é transferido para um modelo descritivo de dados do relevo, estruturados em planos de informação digital derivados do MDE. Na fase de operacionalização em SIG, esse objeto é delimitado com base na integração de diversos conhecimentos, considerando suas características geométricas e topológicas. Dessa forma, os objetos são delimitados de forma a representar feições do terreno (DIKAU, 1990). O aporte de

conhecimento se dá em todas as fases do processo de regionalização. Para isso, são necessárias: (1) a definição do local e das características dos objetos de interesse; (2) a escala na qual serão medidos, como extensão geográfica, a quantidade e a precisão; (3) a apreciação dos dados e as ferramentas disponíveis para a operacionalização do processo; e (4) a definição da abordagem metodológica, ou seja, como os dados e ferramentas serão utilizados para definição de objetos geomorfométricos compatíveis com determinada escala.

Figura 2.7 - Processo de regionalização de objetos geomorfométricos



Fonte: Adaptado de Schmidt e Dikau (1999).

### 2.6.1 Obtenção de objetos geomorfométricos de significado hidrológico

Os objetos geomorfométricos de carácter hidrológico, como bacia hidrográficas, divisores de água, nascentes (cabeceiras), rede hidrográfica e o exutórios podem ser obtidos a partir do processamento de MDE. A primeira etapa desse processamento é a definição da direção do fluxo superficial da água, conduzida

pela força gravitacional. O método mais utilizado para isso é o D8, desenvolvido por Jenson e Domingue (1988). Para cada pixel, o fluxo passa para um dos seus oito pixels vizinhos de maior declividade à jusante. Dificuldades na obtenção da direção de fluxo em MDE são devidas à presença de depressões fechadas e áreas planas, onde uma direção de fluxo não pode ser determinada. As depressões fechadas e as áreas planas podem ser naturais, como as depressões formadas lagos e buracos, e as áreas planas de platôs e planícies, ou causada por limitações do MDE, como pelo efeito dossel (KELLNDORFER et al., 2004).

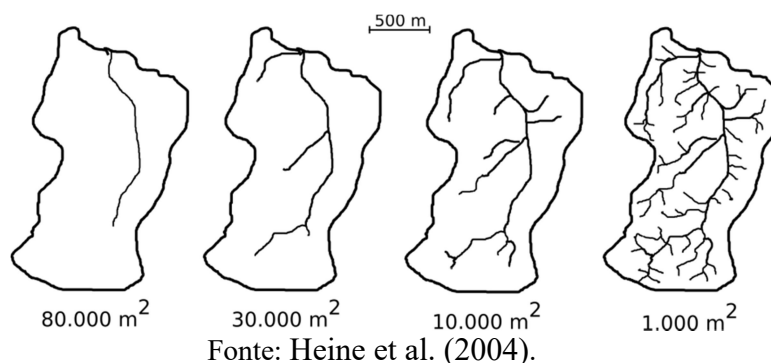
Para resolver depressões fechadas, o método de Jenson e Domingue (1988) realiza seu preenchimento por meio do aumento da elevação no seu interior. Para resolver áreas planas, os autores primeiramente identificam os pixels das áreas planas adjacentes aos pixels com direção de fluxo definida. Uma direção de fluxo é definida para esses pixels, apontando para seu vizinho adjacente de acordo com a direção de fluxo definida pelos desníveis em sua vizinhança. Esse procedimento é repetido até que todas as áreas planas possuam uma direção de fluxo. Uma metodologia alternativa foi proposta por Martz e Garbrecht (1998), em que para cada depressão fechada é identificado um exutório local cuja elevação poderá ser diminuída para eliminar ou reduzir seu tamanho. Quando a depressão não é eliminada dessa forma, é realizado o preenchimento das depressões conforme Jenson e Domingue (1988). Para as áreas planas, Martz e Garbrecht (1998) impõem uma ligeira inclinação aos pixels planos. Essa inclinação é em direção aos pixels adjacentes com elevação menor ou com direção contrária a pixels adjacentes de elevação maior. Após essa inclinação é possível determinar a direção de fluxo. Para compreensão de outros métodos que lidam com depressão fechada e áreas planas é recomendável a leitura dos trabalhos de Soille et al. (2003) e de Lindsay e Creed (2005).

Quando a direção de fluxo é definida para todos os pixels da área, a etapa seguinte e quantificação do fluxo acumulado, que é uma grade contínua na qual o valor da célula é o número de células “fluindo” para ela. Portanto, uma célula do divisor de água da bacia possui fluxo acumulado 1 (um). A célula do exutório possui fluxo acumulado resultante da soma de todas as células da bacia. A rede hidrográfica pode ser obtida pela aplicação de limiares no fluxo acumulado cujos valores são

determinados pelos valores do fluxo acumulado nas posições das nascentes ou cabeceiras. As células com fluxo acumulado maiores que esses limiares são classificadas como rede hidrográfica. Os limiares geralmente assumem um valor definido por uma única amostra de nascente ou por uma média amostral de várias nascentes. No entanto, diversos autores propuseram metodologias para obtenção da rede hidrográfica por meio de múltiplos limiares, sendo um limiar para cada nascente (BANON, 2013; HEINE; LANT; SENGUPTA, 2004; MONTGOMERY; FOUFOULA-GEORGIU, 1993; TUCKER et al., 2001). Os limiares normalmente são definidos por mineração de dados ou análise de regressão utilizando variáveis independentes, tais como o próprio fluxo acumulado, a declividade, ou a curvatura.

A aplicação e validação de metodologias com o uso de múltiplos limiares demandam grandes esforços e dados detalhados, conseqüentemente a abordagem do limiar único continua sendo a mais adotada por diversos especialistas (PERSENDT; GOMEZ, 2016; STANISLAWSKI; FALGOUT; BUTTENFIELD, 2015). Na prática, o limiar é definido de acordo com a observação de imagens de satélites, fotografias aéreas ou mapas topográficos, nos quais se observam onde os rios se iniciam e determina-se um limiar pelo método de tentativa e erro. Limiar de valor elevado forma uma rede hidrográfica menos densa e, portanto, menos detalhada, enquanto que um limiar menos elevado forma rede hidrográfica mais densa e detalhada (Figura 2.8). O grau de detalhamento da rede hidrográfica deve ser pautado de acordo com a escala dos rios que se pretende representar e com o nível de detalhe dos dados de entrada.

Figura 2.8 - Efeito do valor do limiar aplicado sobre o fluxo acumulado na rede hidrográfica



Fonte: Heine et al. (2004).

### 2.6.2 Obtenção de objetos geomorfométricos de significado geomorfológico

Objetos geomorfométricos que representam feições geomorfológicas ou unidades de relevo reconhecíveis podem ser delimitados por técnicas de classificação a partir de variáveis geomorfométricas primárias, como elevação, curvatura e declividade. Essas técnicas facilitam a discriminação de classes ou regiões com vista à máxima homogeneidade interna e mínima homogeneidade entre regiões. A discriminação de unidades do relevo por meio de classificação automática é uma alternativa ao custo operacional e ao nível de subjetividade, normalmente altos, dos processos de classificação manual. Tal alternativa é viabilizada pela disponibilização de MDE de média a alta resolução espacial para grandes áreas e de recursos de SIG para seu processamento. A classificação do relevo se aplica a diversas áreas da geociência, como geomorfologia, pedologia e geologia.

Para melhor distinção dos métodos de classificação (e segmentação) e para facilitar o conhecimento de suas potencialidades e limitações há os seguintes agrupamentos ou categorias (LU; WENG, 2007; MACMILLAN, 2004):

- Manual e automático. Nos métodos manuais, o especialista define os limiares ou as regras de classificação e as executa sem a sua automatização por algoritmos computacionais. Nos métodos automáticos, as regras de classificação são aplicadas de maneira automatizada por algoritmos computacionais;
- Supervisionado e não supervisionado. Nos métodos supervisionados, as classes são definidas previamente e um conjunto de amostras controladas é fornecido na operação do classificador para ajustar seu funcionamento às classes de interesse, num processo denominado *treinamento*. Nos métodos não supervisionados, não há um treinamento do classificador *a priori*, sendo que o classificador faz a partição dos dados em  $n$  classes com base em informações estatísticas de todo o conjunto de dados;
- Paramétrico e não paramétrico. Nos classificadores paramétricos, a distribuição (gaussiana ou outra qualquer) dos dados é pressuposta. Parâmetros

estatísticos como média dos valores ou correção podem ser considerados para separação dos dados. Classificadores não paramétricos não pressupõem distribuição dos dados;

- Local e contextual. Os classificadores locais consideram somente o valor da variável temática sem considerar aspectos de vizinhança espacial ou dependência espacial nos algoritmos. Os classificadores contextuais consideram o contexto espacial, por exemplo, ao agregar dois pontos (ou dois pixels) em uma mesma classe o classificador analisa se esses dois dados estão distantes ou próximos espacialmente;

- Discreta (rígida) e contínua. As classes discretas apresentam limites exatos, como os polígonos. As classes contínuas, ou classificação contínua, apresentam graduações no espaço permitindo que indivíduos sejam membros parciais de diferentes classes.

A Tabela 2.4 apresenta diversos estudos de classificação do relevo de acordo com variáveis geomorfométricas utilizadas, resolução espacial dos dados, métodos de classificação e categorias dos métodos empregados. Em suma, todas as metodologias apresentam vantagens e desvantagens. A escolha do método mais conveniente depende da área de estudo, do tratamento dos dados utilizados e dos objetivos do estudo. Em geral, há tendência na adoção de classificadores contextuais por teoricamente abordarem mais convenientemente os objetos. No entanto isso não é totalmente comprovado devido à escassez de estudos comparativos no âmbito da classificação do relevo. Segundo Drăgut e Eisank (2011), a classificação local (pixel por pixel) define classes ou regiões utilizando somente atributos temáticos, sem considerar a continuidade geográfica dos dados (sua vizinhança espacial, ou topologia) e, portanto, não é adequada para discriminar os objetos do meio físico. A principal crítica quanto a esta afirmação advém de que, se os atributos temáticos apresentam dependência espacial, os atributos espaciais são considerados implicitamente na classificação local (BURROUGH; GAANS; MACMILLAN, 2000).

O segmentador multiresolução (BENZ et al., 2004), que é baseado em agrupamentos por crescimento de regiões, é uma das abordagens mais adotadas

atualmente, principalmente para segmentação de imagens de alta resolução espacial. O usuário controla a segmentação do algoritmo multirresolução por meio de um parâmetro que afeta o tamanho dos segmentos (parâmetro referido por *scale* - escala - na operação dos algoritmos). Pode-se controlar, também, o grau de importância de cada variável geomorfométrica para a segmentação. Uma das críticas em relação a esse algoritmo é em relação ao controle do tamanho, que é muito restritivo quanto a objetos de diferentes extensões. Uma das formas de minimizar essa restrição é realizar uma classificação dos segmentos subsequentemente a segmentação para a formação de agrupamentos hierarquicamente superiores. A forma mais simples consiste em estabelecer livremente diferentes níveis de tamanho (assim como de forma, ou outros parâmetros), conforme a classe ou unidade de relevo em questão, gerando diferentes mapas que posteriormente poderão ser agregados para formar um único mapa com classes de diferentes tamanhos (ANDERS; SEIJMONSBERGEN; BOUTEN, 2011).

Há forte e crescente aplicação dos métodos de classificação contínua, ou classificação *fuzzy* (IRVIN; VENTURA; SLATER, 1997; MACMILLAN, 2004). Isso é devido ao fato de que, em geral, os fenômenos e entidades naturais possuem variação gradual (contínua) no espaço. Dessa forma, o estabelecimento de classes com limites rígidos, características internas uniformes e mudanças abruptas entre duas classes adjacentes pode ser inapropriado e resultar em perda de informação útil, além de aumentar erros de classificação (BURROUGH; GAANS; MACMILLAN, 2000). Classificadores contínuos permitem a representação do grau de associação de uma determinada célula ou unidade com diferentes classes temáticas definidas, que é uma vantagem em relação a classificadores discretos. No entanto, a representação de classificações contínuas exigem um maior número de mapas e uma legenda mais complexa do que as classificações rígidas.



Tabela 2.4 - Exemplos de estudos de classificação de variáveis geomorfométricas

Referência	Área	Variáveis utilizadas	Escala dos dados	Método de classificação	Categorias do método de classificação
Hammond (1964)	48 Estados dos EUA	Declividade e Amplitude	Curvas de nível com intervalos de 15 a 60m	Porcentagem das variáveis dentro de limites definidos	Manual, supervisionado, não-paramétrico, local e discreto
IPT (1981)	São Paulo, Brasil	Amplitude, declividade, forma e extensão das encostas e dos topos, densidade e padrão de drenagem	Imagens na escala de 1:250.000 e cartas topográficas na escala de 1:50.000 e 1:100.000	Mapeamento por meio de interpretação de imagens e descrição quantitativa dos polígonos	Manual, não-supervisionado, não-paramétrico, contextual e discreto
Dikau et al. (1995)	Estado do Novo México, EUA	Declividade e amplitude	200m	Porcentagem das variáveis dentro de limites definidos	Automático, supervisionado, não-paramétrico, local e discreto
(Dymond et al. (1995)	Áreas da Nova Zelândia	Declividade, orientação de vertente e elevação	12,5m e 2m	Aplicação de limiares e agrupamento por crescimento de regiões (ACR)	ACR: Automático, não-supervisionado, paramétrico, contextual e discreto
Ross e Moroz (1996)	Estado de São Paulo	Declividade, distância entre interflúvio, amplitude, densidade de drenagem, etc.	Imagens na escala de 1:250.000	Interpretação de imagens	Manual, não-supervisionado, não-paramétrico, contextual e discreto
Irvin et al. (1997)	Sul do Estado de Wisconsin, EUA	Elevação, Declividade, Curvatura vertical e horizontal, ângulo de incidência solar, índice topográfico composto	10m	Aplicação dos métodos de agrupamento ISODATA e fuzzy k-means (FKM)	FKM: Automático, não-supervisionado, paramétrico, local e contínuo
Brown et al. (1998)	Sudeste do Estado de Michigan, EUA	Elevação, relevo relativo, rugosidade e declividade	95m	Classificador de máxima verossimilhança (CMV) e redes neurais (RN)	Automático, supervisionado, paramétrico (CMV) e não-paramétrico (RN), local e discreto
Giles (1998)	Sudoeste do território de Yukon, Canadá	Índices a partir de bandas espectrais do SPOT e índices a partir da elevação, declividade, curvatura e ângulo de incidência solar	20m	Análise discriminante	Automático, supervisionado, não definido (paramétrico ou não-paramétrico), híbrido (local e contextual) e discreto
Miliaresis e Argialas (1999)	Basin and Range Province, Sudoeste dos EUA	Declividade e orientação de vertente	925m	Agrupamento por crescimento de regiões	Automático, supervisionado, não-paramétrico, contextual e discreto
Burrough et al. (2000)	Alberta, Canada e French pre-Alps, França	Elevação, declividade, curvatura, <i>Wetness index</i> , proximidade com o divisor e irradiação anual	5m e 75m	Fuzzy k-means	Automático, não-supervisionado, paramétrico, local e contínuo

continua

Tabela 2.4 - Conclusão

Macmillan et al. (2000)	Alberta, Canada	Declividade, curvatura, <i>wetness index</i> e diversos índices de altura e distância relativa	5m	Aplicação da lógica fuzzy nas variáveis	Automático, não-supervisionado, não-paramétrico, local e contínuo
Hengl e Rossiter (2003)	Região da Baranya, Croácia	declividade, curvatura, fluxo acumulado, <i>viewshed</i> , <i>wetness index</i> , índice de transporte de sedimentos e distância da drenagem mais próxima	10m	Classificador de máxima verossimilhança	Automático, supervisionado, paramétrico, local e discreto
Drăguț e Blaschke (2006)	Planície Transylvanian, Romênia e Alpes Oriental, Alemanha	Elevação, curvatura e declividade	46m, 57m e 5m	Segmentação multiresolução	Automático, não-supervisionada, paramétrico, contextual e discreto
Prima et al. (2006)	Nordeste de Honshu, Japão	Média e desvio padrão da declividade e da exposição topográfica	50m	Classificação a utilizando a distância Jeffries-Matusita	Automático, supervisionado, paramétrico, local e discreto
Iwahashi e Pike (2007)	Japão, EUA, Globo	Declividade, textura da superfície e curvatura	55m, 270 m e 1 km	Limiares definidos por valores médios das variáveis	Automático, não-supervisionado, paramétrico, local e discreto
Richardson et al. (2009)	Duas regiões no Estado de Ontario, EUA	Declividade	1m	Agrupamento por crescimento de regiões (método de Canny)	Automático, não-supervisionado, paramétrico, contextual e discreto
Jasiewicz e Stepinski (2013)	Polônia	Elevação	30m	Aplicação do algoritmo geomorphons	Automático, supervisionado, não-paramétrico, local e discreto
Wieczorek e Migoń (2014)	Montanha Bystrzyckie e Bacia Jelenia Góra, localizadas na Polónia	Elevação, relevo relativo, orientação de vertentes, declividade e curvatura	25m	Agrupamento por K-Median	Automático, não-supervisionado, não-paramétrico, local e discreto
(Manfré et al.(2015)	Estado de São Paulo	Elevação, declividade, densidade de drenagem e curvatura plana e vertical	90m e 30m	Segmentação multiresolução (SM) e classificação por árvore de decisão (AD)	SM: Automático, não-supervisionado, paramétrico, contextual. discreto
(Drăguț e Dornik (2016)	Branisca, România e Gottingen, Alemanha	Declividade, curvaturas e <i>wetness index</i>	30m e 25m	Segmentação multiresolução	Automático, não-supervisionado, paramétrico, contextual, discreto
Valeriano e Rossetti (2017)	Amazônia Central, Brasil	Elevação, declividade, curvatura vertical e relevo relativo	30m	Segmentação por crescimento de regiões	Automático, não-supervisionado, paramétrico, contextual e discreto

Fonte: Produção do autor.

### 2.6.3 Análise geoestatística e interpolação

Dados geomorfométricos, incluindo pontos geomorfométricos e objetos geomorfométricos não apresentam necessariamente distribuição espacial estruturada em regiões contíguas (Subitem 2.2). As técnicas geostatística possuem duas funções principais que são úteis no processo de regionalização de variáveis geomorfométricas: a análise do padrão espacial de variáveis utilizando semivariogramas, o qual permite avaliar a continuidade/dependência espacial das variáveis; e a obtenção de parâmetros geoestatísticos usados para a interpolação por krigagem. A seguir serão abordados alguns aspectos de geostatística e interpolação por krigagem ordinária utilizados no escopo deste estudo. Uma descrição detalhada sobre métodos de interpolação e geoestatística é apresentada em Burrough e Macdonnell (2009) e Webster e Oliver (2007).

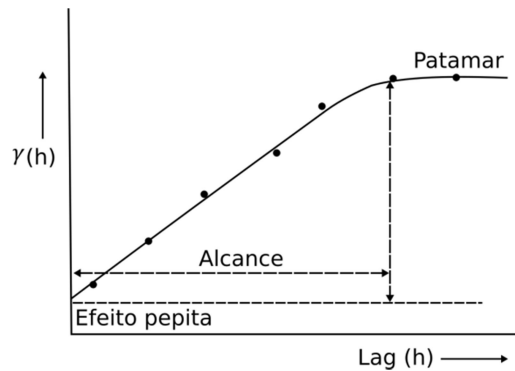
A interpolação se baseia na premissa de que a distribuição de valores espaciais, seja ela da elevação ou qualquer outro atributo dotado de coordenadas geográficas, não é aleatória, sendo que valores próximos uns dos outros na superfície tendem a ser mais parecidos que aqueles distantes. O padrão de distribuição espacial das variáveis é comumente descrito pela semivariância estimada  $\hat{\gamma}(h)$ , que mede a dissimilaridade espacial entre pares de dados separados pela distância  $h$ :

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \{z(x_i) - z(x_i + h)\}^2 \quad 2.3$$

Onde,  $n$  é o número de pares de observações da variável  $z$  nos locais  $x_i$ . O diagrama de dispersão de  $\hat{\gamma}(h)$  e  $h$  é conhecido como variograma experimental, que fornece informações úteis para interpolação das variáveis. Para isto é necessário primeiramente traçar uma curva teórica que se ajusta ao variograma experimental (Figura 2.9). Essa curva pode ser definida por funções, tais como exponenciais, gaussianas ou esféricas. Essas funções podem ser escolhidas por métodos automáticos, implementados em diversos programas computacionais, ou de maneira visual, em que a função é escolhida pela avaliação da semelhança gráfica. Em contraposição, os métodos automáticos

empregam medidas de ajuste entre os semivariogramas experimental e teórico, como análise da soma quadrática das diferenças (GOOVAERTS, 1999).

Figura 2.9 - Exemplo de variograma com efeito pepita, alcance e patamar



Fonte: Burrough e Macdonnell (2009).

A curva traçada no variograma experimental revela alguns aspectos importantes, como início em valores baixos de  $\hat{\gamma}(h)$  e aumento até atingir o patamar, quando se torna uma reta horizontal. A distância  $h$  que marca o início do patamar é definida como alcance, a partir do qual não há mais dependência espacial entre os dados. O valor de  $\hat{\gamma}(h)$ , onde a curva intercepta o eixo  $y$ , é conhecido como efeito pepita, que é uma estimativa do erro residual ou ruído espacialmente independente.

O formato do variograma experimental e da curva do variograma teórico, a dimensão efeito pepita, do patamar e do alcance podem levar a diferentes interpretações. Algumas delas são destacadas a partir de Burrough e Macdonnell (2009):

- Quando o efeito pepita domina a variação do variograma experimental, a interpretação é de que os dados são ruidosos e inadequados à interpolação;
- Um variograma no qual a semivariância experimental é muito dispersa indica que poucas amostras foram utilizadas em sua elaboração;
- O alcance do variograma representa o limite de distância em que ocorre dependência espacial entre os dados, o que determina o tamanho máximo da janela

de dados a serem utilizados na interpolação. A partir da posição de cada estimativa, os dados mais distantes do que o alcance não são usados no cálculo;

- Se todas as observações estão mais distantes que o alcance, a melhor estimativa é a média geral das observações;

- O variograma teórico gaussiano indica um padrão de variação suave;

- Um variograma teórico esférico tem um ponto de transição claro indicativo de que há um padrão dominante; e

- O variograma teórico exponencial sugere que padrão de variação com transição gradual sobre alcances espalhados ou interferência de vários padrões.

Ao considerar a dependência espacial dos dados, os variogramas teóricos podem ser utilizados para determinar a variação dos pesos ( $\lambda_i$ ) com a distância entre amostras para a interpolação dos dados. O valor em locais não observados  $\hat{z}(x_0)$  é estimado pela seguinte equação geral:

$$\hat{z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z(x_i) \quad 2.4$$

Onde,  $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$ . Esse método de interpolação é conhecido como krigagem ordinária. Ele é um interpolador exato no sentido de que os valores interpolados para os locais observados coincidem com os valores observados.

## 2.7 Geomorfometria aplicada ao mapeamento digital de solos

O relevo é considerada um dos fatores de formação do solo por controlar a distribuição de água, luz solar e calor em sua superfície e sub-superfície, que por sua vez influenciam de forma interativa o microclima do solo, a presença de microrganismos e vegetação, bem como as taxas de remoção, transporte e acúmulo de sedimentos e de substâncias químicas (LEPSCH, 2012). As propriedades físicas, químicas e biológicas dos solos são constantemente associadas às características do relevo.

Nas últimas décadas, diversas metodologias para o mapeamento de solos foram propostas e aperfeiçoadas com o uso de tecnologias digitais como os MDE, Sistema de Posicionamento Global (GPS) e de ferramentas de SIG (HARTEMINK; MCBRATNEY; MENDONÇA-SANTOS, 2008), cujo emprego é comumente referido como mapeamento digital dos solos. O uso de dados geomorfométricos para o mapeamento digital dos solos se destaca sob duas abordagens (MACMILLAN, 2004). A primeira estabelece relações estatísticas entre variáveis geomorfométricas com variação espacial contínua (variáveis primárias, secundárias e compostas) e propriedades dos solos. Essa abordagem é utilizada para estimar atributos contínuos (GESSLER et al., 1995; HENDERSON et al., 2005; HEUVELINK; WEBSTER, 2001; KUMAR; LAL; LIU, 2012; MCKENZIE; RYAN, 1999) e também classes (HENGL; ROSSITER, 2003b; SCULL; FRANKLIN; CHADWICK, 2005) DE SOLOS. A segunda abordagem se pelo relacionamento de variáveis geomorfométricas de segmentos ou objetos geomorfométricos com atributos dominantes dos solos ou classes de solos (DRĂGUȚ; DORNIK, 2016; MACMILLAN, 2004).

Diversos autores testaram métodos de classificação dos solos com base somente em variáveis geomorfométricas ou na combinação com outras informações úteis. Por exemplo, Irvin et al. (1997) testaram os métodos de classificação k-médias *fuzzy* e ISODATA utilizando seis variáveis geomorfométricas obtidas a partir de MDE de 10 m de resolução espacial em uma área de 50 hectares do sul do Estado de Wisconsin, Estados Unidos. Os resultados mostraram alta correspondência entre limites de classes de solos delineados manualmente e os resultantes das classificações k-médias *fuzzy* e ISODATA. Os autores relataram que os métodos de classificação automática podem contribuir para: (1) determinar áreas que requerem trabalho de campo mais intensivo; (2) reduzir a quantidade de amostras em áreas homogêneas; (3) a delinear objetivamente unidades pedológicas onde existe forte correspondência com as unidades de relevo; e (4) e prover a base para extrapolação/classificação de valores em áreas não amostradas.

Hengl e Rossiter (2003) utilizaram nove variáveis geomorfométricas obtidas a partir de MDE de 10 m de resolução espacial, numa área de 1062 km<sup>2</sup> da Croácia para a classificação supervisionada dos solos utilizando o método de máxima verossimilhança. Os autores obtiveram exatidão global de 45,3% e Kappa de 42,6% para uma

classificação de 21 classes de solos. Após simplificação da legenda para 15 classes na mesma área de estudo, os autores obtiveram exatidão global de 90,2% e Kappa de 89,3%.

O mapeamento digital de solos no território brasileiro tem sido aplicado por vários especialistas (ARRUDA et al., 2013; CARVALHO-JUNIOR, 2005; COELHO; GIASSON, 2010; GIASSON et al., 2008; MUÑOZ et al., 2011; SILVEIRA et al., 2013; WEBER et al., 2008). Mendonça-Santos et al. (2008), por exemplo, utilizaram dados derivados do SRTM-90m, informações espectrais do projeto *Geocover*, mapa de uso e cobertura da terra e mapa geológico. Com base nesses dados os autores realizaram classificação supervisionada por árvore de decisão de nove classes solos (Ordem) do Estado do Rio de Janeiro. A classificação resultante apresentou erro avaliado em 2,4%.

Dados, técnicas e metodologias úteis para o mapeamento digital de solos estão em constantes avanços. Isso se deve às recentes disponibilizações de MDE e de variáveis geomorfométricas de média a alta resolução espacial para todo o território nacional, como o projeto Topodata (VALERIANO, 2008), assim como a novas técnicas e metodologias de segmentação e classificação de imagens (DRĂGUT; DORNIK, 2016; GAN-LIN; FENG1; XIAO-DONG1, 2017). Esse interesse crescente deve-se à grande demanda de mapas de solos visando a diversas aplicações, como ao planejamento urbano e rural, bem como a modelagens regional e global (BAND et al., 2000; BREVIK et al., 2016).

## **2.8 Dados geomorfométricos**

O MDE é o dado geomorfométrico básico a partir do qual se extraem as demais variáveis geomorfométricas, como declividade, orientação de vertentes e curvaturas. As estruturas de MDE mais comuns são grade regular, curvas de nível e TIN (*triangular irregular networks*). Moore et al. (1991) fizeram uma revisão sobre as estruturas de MDE explicitando vantagens e desvantagens de cada uma. A estrutura em grade regular é a mais utilizada por apresentar mais facilidades de processamento e integração com outros dados em ambiente SIG. Essa estrutura é representada por uma matriz com valores de altitude, cujas células (*pixels*) representam posições geográficas de seus dados. As demais variáveis geomorfométricas derivadas do MDE são armazenadas em

outros planos de informação da mesma estrutura, muitas vezes representados como camadas sobre uma mesma área de cobertura.

A principal fonte de MDE de larga escala atualmente é o sensoriamento remoto, por meio de tecnologias, como estereoscopia de radar de abertura sintética (SAR), estereofotogrametria e varredura a laser (por exemplo, LiDAR - *Light Detection And Ranging*). Os MDE SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) (FARR et al., 2007; RABUS et al., 2003) e ASTER-GDEM (FUJISADA; URAI; IWASAKI, 2012) são os únicos MDE de alta a moderada resolução espacial disponíveis gratuitamente.

Os dados SRTM foram obtidos durante o período de 11 a 22 de fevereiro de 2000 por estereoscopia SAR em um projeto de cooperação entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), a NIMA (*National Imagery and Mapping Agency*), o Departamento de Defesa dos Estados Unidos e agências espaciais da Alemanha e da Itália. Esses dados recobrem cerca de 80% da área terrestre do planeta, entre as latitudes 60° N e 56° S. Os MDE SRTM foram disponibilizados com resoluções espaciais de 1 e 3 segundos de arco, que equivalem a aproximadamente 30 e 90 m, respectivamente.

Os dados ASTER-GDEM foram elaborados pela agência espacial do Japão e pela NASA com base em pares estereoscópicos de imagens do satélite Terra, adquiridas a partir do ano de 2000. Esses dados cobrem 99% da área terrestre do planeta e foi disponibilizado com resolução espacial de 1 segundo de arco. Ambos os dados, SRTM e ASTER-GDEM, foram gerados para suprir mapeamentos na escala de 1:100.000 a 1:250.000. Existem várias versões desses dados disponíveis em plataformas *online*. Algumas dessas versões são fornecidas pelas próprias agências oficiais geradoras dos dados, enquanto outras versões são fornecidas por pesquisadores de diversas instituições após processamentos visando a melhoria dos dados. Algumas particularidades das principais versões dos MDE disponíveis para o território brasileiro são apresentadas na Tabela 2.5.

Os MDE gerados a partir de estereoscopia SAR e estereofotogrametria, como o SRTM e o ASTER-GDEM, são sensíveis a objetos que estão sobre a superfície do terreno, como construções civis e vegetação. Portanto, as variações desses dados acompanham a variação de elevação desses objetos, resultando em aumento da elevação e ocultação de



detalhes do terreno (KELLNDORFER et al., 2004). No caso do efeito dossel, as maiores consequências para o cálculo de variáveis geomorfométricas estão na interface entre os limites de áreas vegetada e não vegetada, principalmente em terrenos planos (VALERIANO et al., 2006). Em terrenos montanhosos o efeito dossel não é muito agravante, pois a forte variação do terreno tende a ser superior ao efeito dossel. Um outro fator importante, que afeta a qualidade do MDE, é o tipo de processamento realizado para sua elaboração, comumente feito por técnicas de filtragem e interpolação. Excesso de suavização ou aumento dos ruídos no MDE podem resultar desses processamentos. Valeriano e Rossetti (2010) observaram que alguns interpoladores produzem padrões artificiais no MDE, que afetam diretamente o cálculo das variáveis geomorfométricas. Considerando que diferentes versões dos MDE foram elaboradas com diferentes metodologias (Tabela 2.5), é pertinente considerar as implicações dessas metodologias sobre as informações geradas a partir deles.

Valeriano et al. (2006) apresentaram uma metodologia para refinamento dos dados SRTM com base em análise geoestatística e interpolação por krigagem. Os dados da primeira versão do MDE SRTM, que possui 3 segundos de arco, foram interpolados para 1 segundo de arco. Essa metodologia não teve por objetivo melhorar a precisão dos dados ou reduzir o efeito dossel. No entanto, o MDE resultante teve significativa melhoria para a identificação visual de feições do relevo, bem como cálculo de variáveis geomorfométricas locais. O refinamento dos dados SRTM em conjunto com outras metodologias desenvolvidas para estimativa de variáveis geomorfométricas locais (VALERIANO; ALBUQUERQUE, 2010) culminaram com a elaboração do projeto Topodata, um banco de variáveis geomorfométricas locais para o território brasileiro (VALERIANO; ROSSETTI, 2012).

Tabela 2.5 - Resumo das principais versões de MDE SRTM e ASTER-GDEM de média resolução espacial disponíveis para todo o território brasileiro

Versão	Resolução	Tipo de dado e principais processamentos	Referências
SRTM versão 1	3"	Originais (1"). Exceto para o território dos EUA, reamostragem para 3" por meio de médias de valores em janelas de 3x3 pixels	Gesch et al. (2002); Farr et al. (2007)
SRTM versão 2 e 2.1-NASA	3"	Originais (1"). Remoção de pequenos vazios, delineamento da costa marítima e de corpos d'água e aplainamento de corpos d'água. Reamostragem para 3" por meio do valor do pixel central em janelas de 3x3 pixels	Gesch et al. (2002); Slater et al. (2006), LP-DAAC (2015)
SRTM versão 2.1 - LP-DAAC	3"	Originais (1"). Remoção de pequenos vazios, delineamento da costa marítima e de corpos d'água e aplainamento de corpos d'água. Reamostragem para 3" por meio da média de valores em janelas de 3x3 pixels	Gesch et al. (2002); Slater et al. (2006), LP-DAAC (2015)
SRTM versão 3	3"	Originais (1"). Preenchimento de vazios utilizando dados adicionais (incluindo os do sensor ASTER), reamostragem para 3" sob duas abordagens diferentes: média e valor central em janelas de 3x3 pixels	Gesch et al., 2002; LP-DAAC (2015)
SRTM 1"	1"	Originais (1"). Remoção de pequenos vazios, delineamento da costa marítima e de corpos d'água e aplainamento de corpos d'água. Foi disponibilizada recentemente para o território nacional	Gesch et al., (2002); Slater et al. (2006)
SRTM Embrapa		Versão 1. Preenchimento de depressões espúrias, remoção de picos, geração de curvas de nível e interpolação dos dados utilizando o módulo TOPOGRID	Miranda (2005)
SRTM 4.1	3"	Versão 2. Preenchimento de vazios utilizando diferentes métodos de acordo com o tamanho do vazio e com a presença/ausência de dados auxiliares. Recorte dos dados com os limites da costa marítima	Jarvis et al. (2008)
SRTM Topodata	1"	Versão 1. Interpolação por krigagem para 1" utilizando parâmetros unificados para todo o Brasil. Diversas variáveis geomorfológicas locais foram elaboradas e disponibilizadas	Valeriano e Albuquerque (2010); (Valeriano e Rossetti, 2012)
ASTER GDEM versão 2	1"	Combinação de diferentes cenas para gerar dados sem a presença de nuvens, aplainamento de corpos d'água e correção de anomalias utilizando dados auxiliares (SRTM, NED, etc.)	Fujisada et al. (2012)

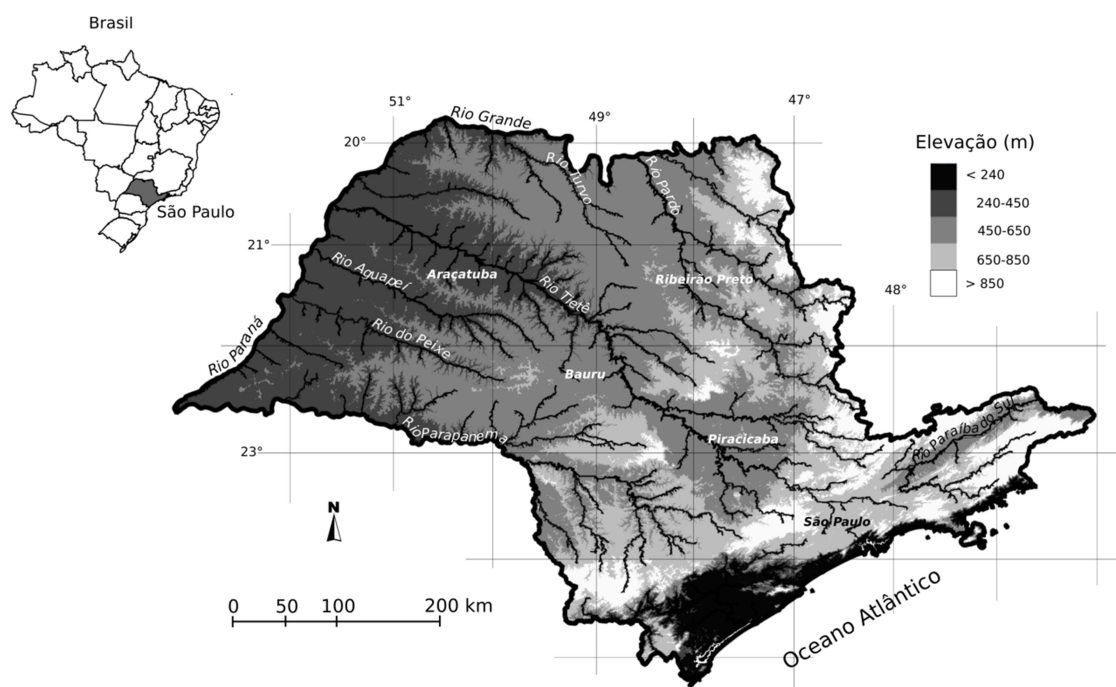
Fonte: Produção do autor.

### 3 ÁREA DE ESTUDO

#### 3.1 Localização

A área de estudo compreende 248.222 km<sup>2</sup> do Estado de São Paulo, localizado no sudeste do Brasil (Figura 3.1). Sua escolha deve-se à disponibilidade de diversos mapeamentos, como geológicos, geomorfológicos e pedológicos na escala de 1:1.000.000 ou mais detalhados, bem como à diversidade de terrenos que possibilitam análises diversas do relevo. Por se tratar de um estudo regional, a grande extensão foi também um dos fatores determinantes em sua escolha.

Figura 3.1 – Localização, hipsometria e hidrografia geral da área de estudo no Estado de São Paulo, Brasil



A elaboração desta figura foi realizada com dados Topodata-SRTM.

Fonte: Produção do autor.

A seguir, são apresentados aspectos relacionados a geologia, geomorfologia, pedologia, recursos hídricos, clima e do uso e cobertura da área de estudo.

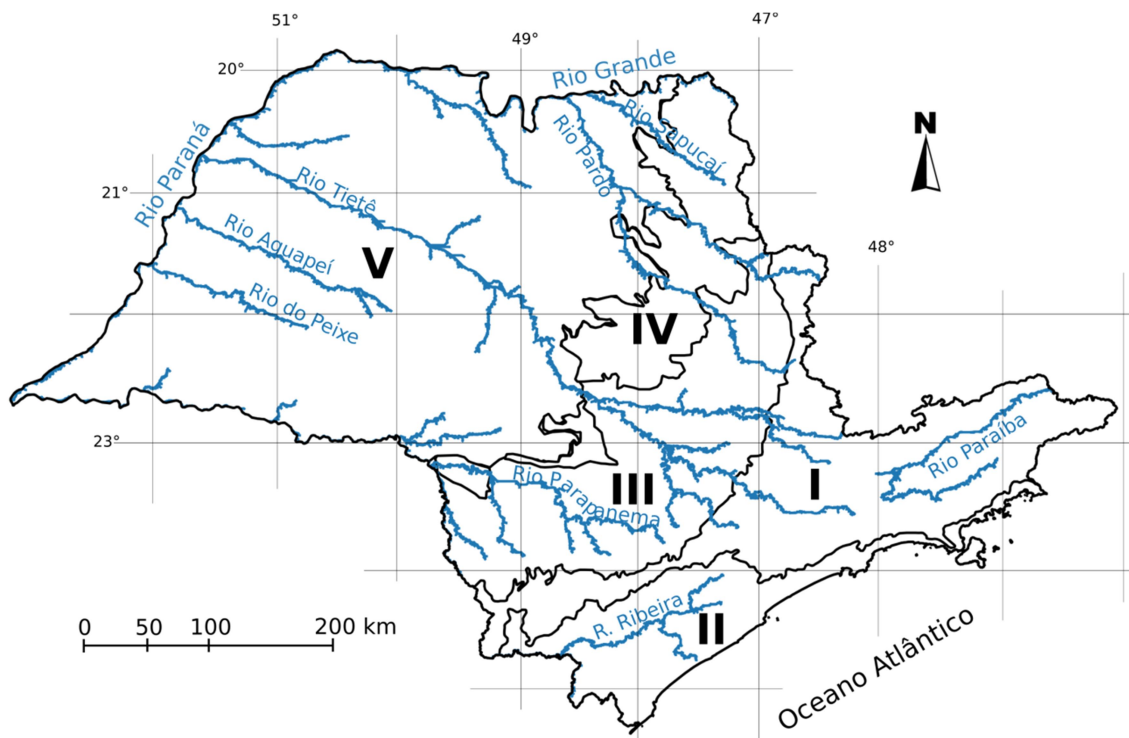
#### 3.2 Contexto geológico e fisiográfico

O Estado de São Paulo compreende rochas do escudo cristalino pré-cambriano em sua parte oriental, que dão lugar a coberturas sedimentares paleozoicas da Bacia do Paraná no sentido do interior. O setor centro norte do Estado consiste em derrames basálticos

refletidos em relevos do tipo cuestas. Ao longo do tempo geológico, a erosão expôs estruturas profundas do maciço cristalino, tais como batólitos graníticos que formam as principais serras. Sedimentos erodidos dessas áreas elevadas se acumularam na Bacia do Paraná (ALMEIDA, 1964).

A área de estudo é dividida em cinco províncias geomorfológicas ou macro unidades de relevo (Figura 3.2). O Planalto Atlântico (província I) é a faixa mais elevada do Estado de São Paulo, e inclui formas de relevo com topo convexo, vales profundos e alta densidade de drenagem (Figura 3.3-a) (ROSS; MOROZ, 1996). Rochas gnáissicas e graníticas suportam esse planalto. Para oeste, ocorrem filitos e micaxistos se estendem do Estado do Paraná até a área do Planalto Paulistano (ALMEIDA, 1964; IPT, 1981).

Figura 3.2 - Províncias geomorfológicas do Estado de São Paulo na escala de 1:500.000



I: Planalto Atlântico; II: Províncias Costeiras; III: Depressão Periférica; IV: Cuestas Basálticas; e V: Planalto Ocidental.

Fonte: Adaptado de IPT (1981).

As Províncias Costeiras (província II) correspondem a uma faixa drenada diretamente para o Oceano Atlântico, com forte presença de serras, que a beira-mar sede lugar a uma

sequência de planícies. Rochas graníticas e gnáissicas suportam o relevo montanhoso das serras do Mar e Paranapiacaba (Figura 3.3-b), bem como maciços litorâneos.

A Depressão Periférica (província III) corresponde a uma faixa rebaixada por erosão, destacando-se saliências cuestiformes de pequena expressão. Nessa província há predomínio de depósitos sedimentares que consistem em arenitos e argilitos e sobretudo tilitos. Essas litologias localmente contêm diques de diabásio, que afloram principalmente nos cursos dos rios (ALMEIDA, 1964; IPT, 1981).

As Cuestas Basálticas (província IV) são de relevo escarpado (Figura 3.3-c-d) nos seus limites com a depressão periférica, seguido de sucessão de grandes plataformas estruturais de relevo suavizado (Figura 3.3-e), inclinada para o interior em direção à calha do Rio Paraná. Essa província consiste em dezenas de metros de rochas formadas por derrames basálticos.

O Planalto Ocidental (província V) é a maior província geomorfológica do Estado. O relevo é bastante suave (Figura 3.3-f). A geologia, de igual maneira, é relativamente simples, sendo representada em grande parte por arenitos, localmente com forte cimentação carbonática, como na região de Marília (ALMEIDA, 1964; IPT, 1981).

Figura 3.3 – Fotografias para ilustrar as diferentes províncias geomorfológicas do Estado de São Paulo



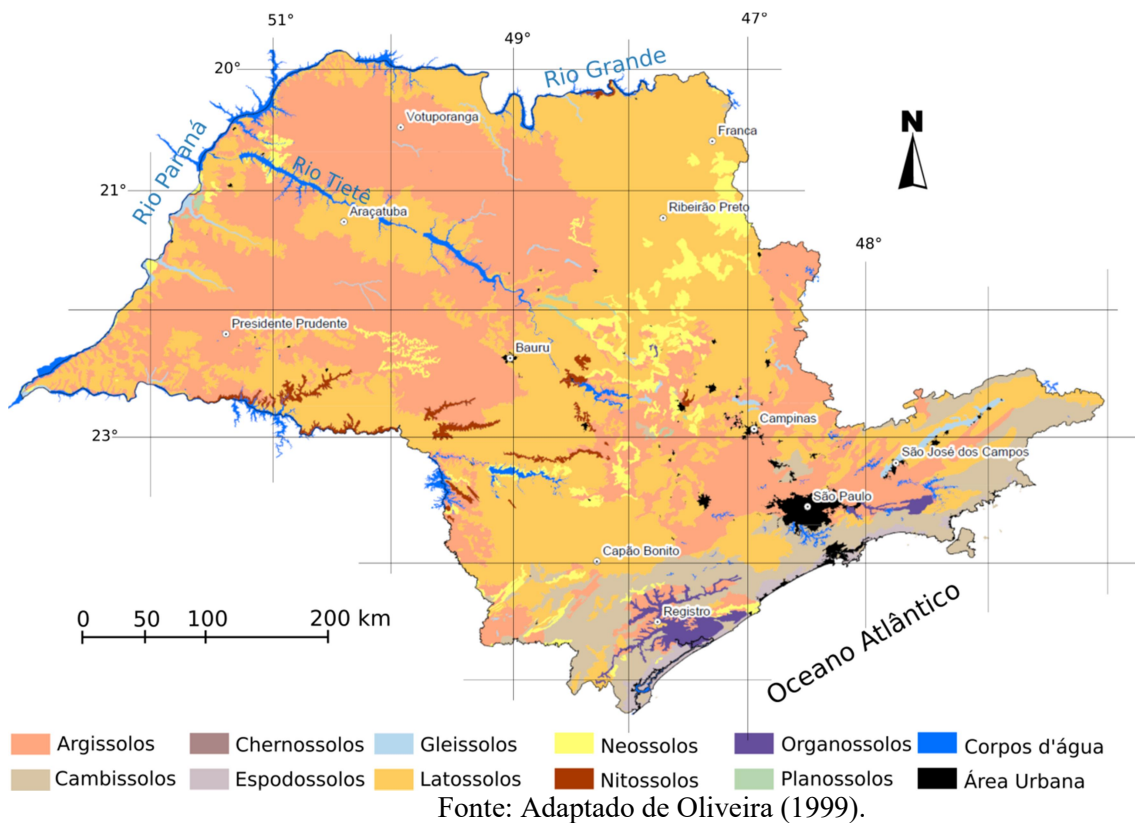
Na fotografia “a”, observa-se a serra da Mantigueira, paisagem que ilustra o Planalto Atlântico; na “b”, a serra do Mar e ao fundo a cidade de Cubatão, que ilustram as Províncias Costeiras; em “c” e “d”, a Serra de Itaqueri em Itirapina-SP e as cuestras de Botucatu, respectivamente, que ilustram as regiões de transição entre as Cuestras Basálticas e a Depressão Periférica; em “e”, região de Santa Rita do Passa Quatro – SP, que ilustra as Cuestras Basálticas; e em “f”, região de Marília – SP, que ilustra o Planalto Ocidental.

Fonte: a: Maciel (2013); b: Moriyama (2015); c: Esparza (2009); d: Silveira (2018); e: Telles (2015); e f: Valley (2015).

### 3.3 Solos

As principais classes de solos do Estado de São Paulo (Figura 3.4) são Argissolos, Latossolos e Cambissolos, que ocupam 41,5, 39,5 e 7,4% da área, respectivamente. Argissolos compõem a classe predominante no Planalto Atlântico e no Planalto Ocidental. Latossolos predominam na Depressão Periférica e nas Cuestas Basálticas. Cambissolos predominam nas Províncias Costeiras. Vale destacar que há também considerável presença de Organossolos nas planícies das Províncias Costeiras (OLIVEIRA, 1999).

Figura 3.4 - Classes de solos do Estado de São Paulo na escala de 1:500.000



Latossolos geralmente são solos mais profundos, porosos, homogêneos em profundidade e mais resistentes à erosão que Argissolos e Cambissolos. Argissolos apresentam gradiente textural elevado do horizonte A para o B, com expressivo aumento na concentração de argila. Quando esses solos encontram-se em relevo íngreme tendem a ser facilmente erodíveis, por causa do material arenoso e menos estruturado nos

horizontes superficiais. Essa diferença de textura entre os horizontes A e B dificulta a infiltração de água e favorece a erosão. Cambissolos são mais jovens e menos profundos que Latossolos e Argissolos, sendo propensos à erosão devido a estrutura em blocos, prismas ou maciça porosa e alta concentração de silte (RESENDE et al., 2014).

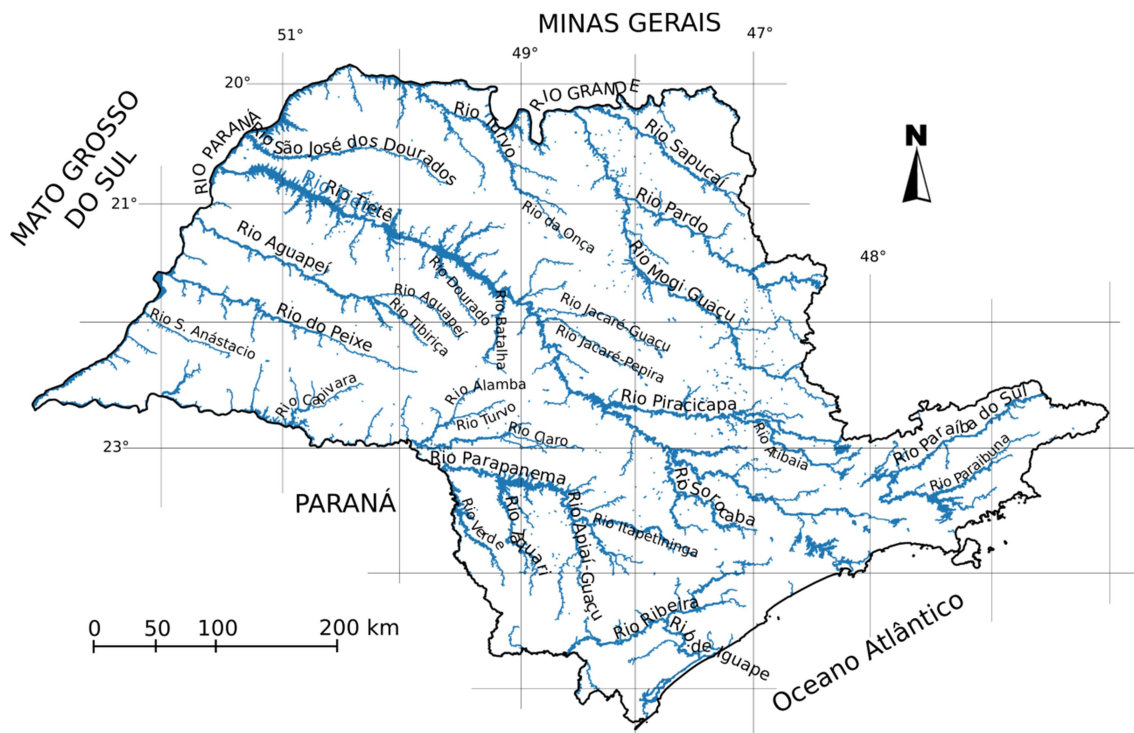
Os Argissolos do Planalto Atlântico são predominantemente Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos de textura argilosa e os Argissolos do Planalto Ocidental são Argissolos Vermelho-Amarelos Eutróficos de textura arenosa/média. Portanto, os Argissolos do Planalto Atlântico são menos férteis e menos arenosos que os do Planalto Ocidental. A maioria dos Latossolos das Cuestas Basálticas é do tipo Latossolos Vermelho Eutroférico de textura argilosa. Esse tipo de solo apresenta coloração avermelhada e é considerado fértil. Na Depressão Periférica também há predomínio de Latossolo Vermelho, mas estes são distróficos e de textura média a arenosa e, portanto, são menos férteis e mais arenosos que os Latossolos das Cuestas Basálticas. Os Cambissolos das Províncias Costeiras estão em relevo montanhoso, por serem solos menos profundos estão mais próximos em profundidade da rocha de origem.

### **3.4 Recursos Hídricos**

Os rios da área de estudo majoritariamente fluem para o Rio Paraná, que faz fronteira entre São Paulo e Mato Grosso do Sul (Figura 3.5). Exceção são rios do extremo oriental da área, que fluem diretamente para o Oceano Atlântico. O Rio Tietê é o rio de maior extensão (1.136 km) e volume, que atravessa toda a área de estudo de leste a oeste. Outros grandes rios que percorrem o interior da área de estudo são o Pardo, Mogi Guaçu, Turvo, São José dos Dourados, Aguapeí, do Peixe, Parapanema, Ribeira do Iguape, Piracicaba e Paraíba do Sul. O Rio Grande é o divisor natural entre os estados de São Paulo e Minas Gerais e o Rio Parapanema divide uma grande extensão dos estados de São Paulo e do Paraná. Em termos de águas subterrâneas, as áreas de maior potencial produtivo se encontram nas Cuestas Basálticas (Aquífero da Serra Geral) e nas regiões de Afloramento do Aquífero Guarani na parte oriental da Depressão Periférica (IRITANI; EZAKI, 2009).



Figura 3.5 - Rede hidrográfica básica do Estado de São Paulo



Elaborado a partir do Modelo Digital de Elevação Topodata-SRTM e dos limites de corpos d'água produzidos pela NGA - *National Geospatial-Intelligence Agency* (Farr et al., 2007).  
 Fonte: Produção do autor.

### 3.5 Clima

A área de estudo tem seis tipos de clima distintos, segundo a classificação climática de Köppen, a maioria do tipo subtropical. O clima dominante é o Cwa, que engloba a maioria da Depressão Periférica e do Planalto Ocidental e é caracterizado por inverno seco (com temperaturas inferiores a 18°C) e verão quente (com temperaturas superiores a 22°C). A precipitação média anual é de 1.400 mm. Algumas áreas serranas do Planalto Atlântico são enquadradas no tipo Cfb, onde a temperatura média do mês mais quente é inferior a 22°C. A precipitação média anual ultrapassa 2000 mm nas regiões mais elevadas. A região do litoral se enquadra no tipo Af, clima tropical úmido ou superúmido, sem estação seca. Na parte sul da área, predomina o tipo Cfa, clima subtropical, com verão quente, onde as temperaturas são superiores a 22°C e a precipitação superior a 30 mm de chuva no mês mais seco. Na extremidade oeste do Estado há uma faixa de norte a sul com clima Aw, com estação chuvosa no verão e seca no inverno. Uma pequena porção nos contornos do Vale do Paraíba possui clima do tipo Cwb, subtropical de altitude, com inverno seco e verão ameno. As temperaturas médias

anuais na área de estudo são em torno de 21 a 23°C, com exceção das regiões mais elevadas, de temperaturas médias inferiores a 20°C (SETZER, 1966).

### **3.6 Uso e cobertura da terra**

Os tipos de uso e cobertura da terra predominantes são agricultura e pastagens. O censo de 2006 indica que área de lavouras temporárias ou permanentes e pastagens ocupavam pelo menos 28,14% e 28,10% da área de estudo, respectivamente (IBGE, 2016). Os principais tipos de culturas agrícolas são cana de açúcar, soja, milho e laranja. Uma estimativa mais recente mostra que cerca de 17,9% da área de estudo é ocupada por cana-de-açúcar (RUDORFF et al., 2010). As florestas naturais estão concentradas em áreas de proteção ambiental predominantemente nas serra da Mantigueira e do Mar. O mapeamento realizado pelo Instituto Florestal indica que as florestas nativas representam 17,3% da área de estudo (IF, 2006). Há também em toda a área de estudo grandes áreas urbanas, com destaque para a região da grande São Paulo, que é a maior região metropolitana do Brasil. Florestas plantadas ocorrem, mas são menos expressiva que as florestas nativas.

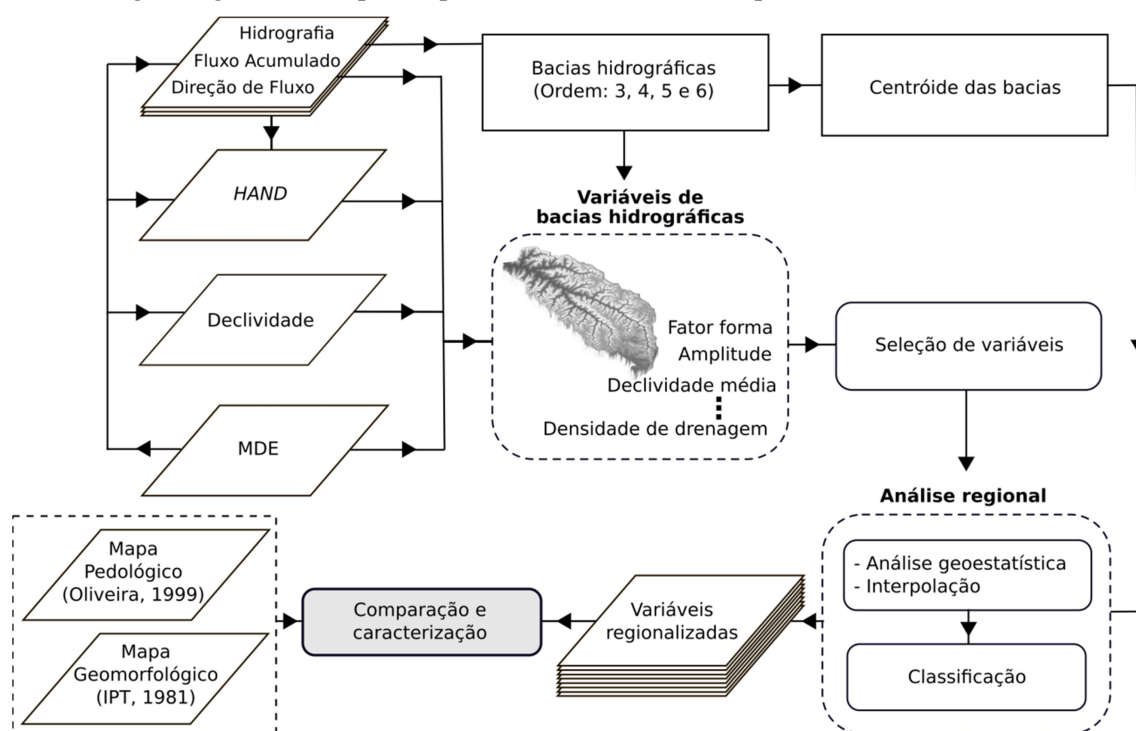
## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Plano Geral

O fluxograma geral dessa pesquisa (Figura 4.1) é resumido nas seguintes etapas:

a) Organização e elaboração dos dados básicos: os dados MDE e declividade foram obtidos a partir do Projeto Topodata (em quadrículas) e mosaicados para formarem os respectivos planos de informação da totalidade da área de estudo. A partir do MDE foram gerados a hidrografia e o *HAND* (*Height Above the Nearest Drainage*);

Figura 4.1 - Fluxograma geral das etapas de processamento e análises aplicadas à área de estudo



Fonte: Produção do autor.

b) Delimitação de microbacias: microbacias de ordens 3, a 6 (ordem Strahler) foram selecionadas e delimitadas por geoprocessamento;

c) Elaboração de variáveis geomorfométricas de microbacia: a partir dos dados foram elaboradas 74 variáveis de microbacia que descrevem aspectos de relevo, forma, tamanho e hidrografia;

- d) Seleção de variáveis geomorfométricas: foi realizada seleção das variáveis geomorfométrica com vista principalmente a uma menor redundância de informações;
- e) Regionalização das variáveis geomorfométricas. Nessa etapa cada variável foi analisada quanto a sua distribuição espacial utilizando análise de semivariograma e posteriormente interpolação por krigagem. Foram definidas regiões com características geomorfométricas homogêneas com base em análise de agrupamento;
- f) Comparação das variáveis com mapas geomorfológico e pedológico: as regiões ou as variáveis regionalizadas foram comparadas com mapas geomorfológico e pedológico; e
- g) As províncias geomorfológicas e as principais classes de solos foram caracterizadas com base nas variáveis geomorfométricas de microbacias.

## 4.2 Dados e recursos de processamento

O MDE e a declividade foram obtidos do Projeto Topodata (VALERIANO, 2008) com a resolução de 1 arco de segundo. A rede hidrográfica disponibilizada pela SMA (SÃO PAULO, 2013) foi utilizada como referência para geração de uma nova rede hidrográfica (Subitem 4.3). Essa geração e a designação de ordens dos seus canais contou com as seguintes ferramentas e métodos do GRASS GIS 6.4.4 (NETELER et al., 2012):

- O algoritmo *r.terraflow* (TOMA et al., 2001) foi utilizado para cálculo da direção de fluxo e do fluxo acumulado por meio do método D8 (O'CALLAGHAN; MARK, 1984). Os procedimentos estão descritos no subitem 4.3;
- As ferramentas *r.stream.order* (JASIEWICZ, 2015) e *r.water.outlet* (EHLSCHLAEGGER, 2016) foram utilizadas para designação de ordens e extração das microbacias, respectivamente;
- A ferramenta *r.raster.vector* (BROWN, 2015) foi utilizadas nas transformações de raster para vetor.

O algoritmo desenvolvido por Rennó et al. (2008), disponível na plataforma TerraHidro, foi utilizado para cálculo do *HAND*;

Funções do pacote *gstat* (PEBESMA; GRAELER, 2018) do R (R, 2018) foram utilizadas para análises geoestatísticas; a função *variogram* foi utilizada para calcular o variograma experimental e a função *fit.variogram* foi utilizada gerar o modelo do variograma experimental.

A função *kmeans* do R foi utilizada para análise de agrupamento das variáveis geomorfométricas pelo método k-médias (HARTIGAN; WONG, 1979).

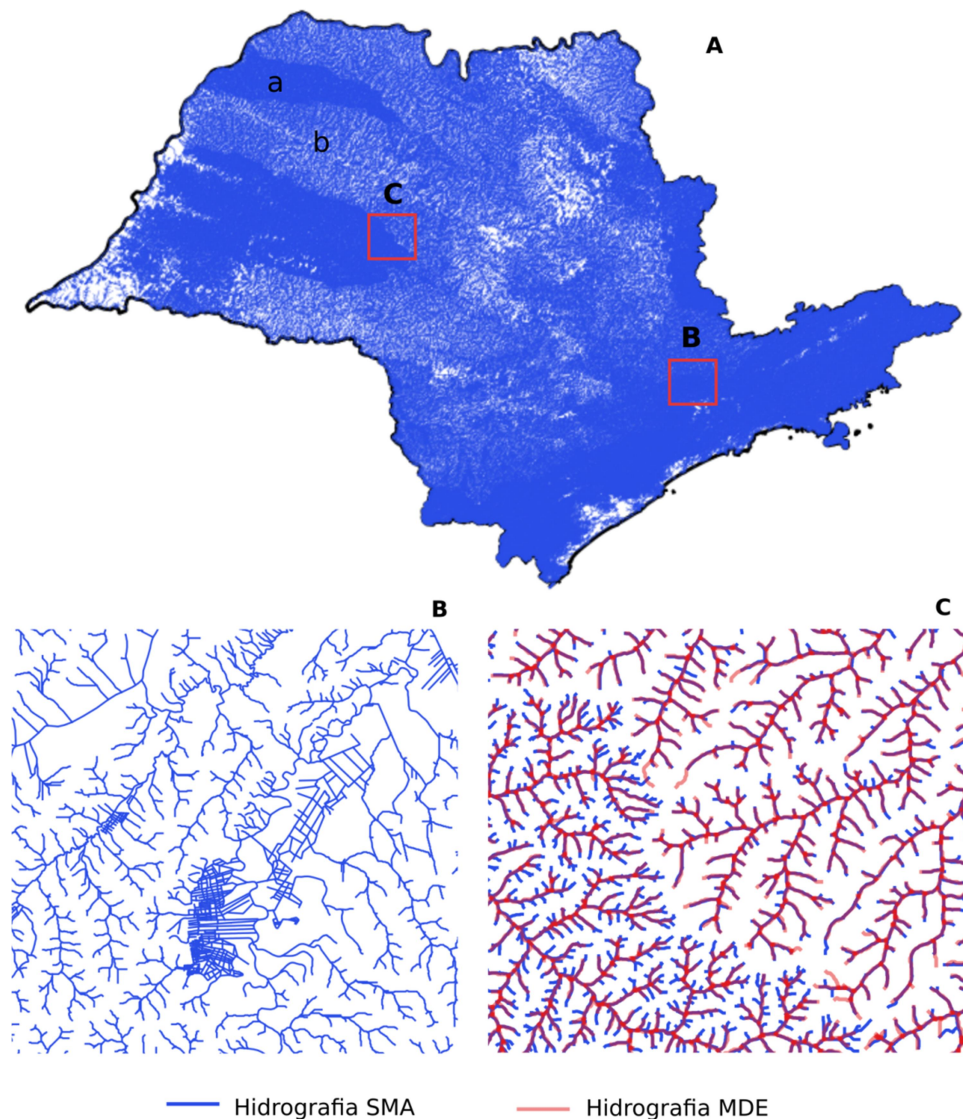
Os procedimentos realizados de maneira repetida para todas as microbacias, como o cálculo das variáveis, foram feitos de maneira automática por linhas de comando (Apêndice A) utilizando os pacotes *spgrass6* (BIVAND, 2016), que faz a interface entre o GRASS e o R, *raster* (HIJMANS, 2017), *mapproj* (BIVAND, 2017a) e *rgdal* (BIVAND, 2017b).

### **4.3 Obtenção da rede hidrográfica e delimitação de microbacias**

A rede hidrográfica digital do Estado de São Paulo disponibilizada pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SÃO PAULO, 2013) tem alguns defeitos (Figura 4.2) que justificaram a elaboração de uma nova rede hidrográfica para a sua utilização. Para isso foram calculados a direção de fluxo e o fluxo acumulado a partir do MDE com as ferramentas descritas no subitem 4.2. A rede hidrográfica, obtida aplicando-se limiar único com valor de  $0,475\text{km}^2$  (aproximadamente 525 pixels de 30 m de resolução espacial) sobre o fluxo acumulado, resultou em um produto melhor por ter sido elaborado em uma única abordagem para toda a área de estudo e por apresentar menos defeitos, como a presença de linhas artificiais (Figura 4.2).

Os segmentos de drenagem de toda a rede hidrográfica foram classificados segundo as ordens de Strahler (1957) e Horton (1945). As ordens Strahler foram utilizadas principalmente para geração de algumas variáveis geomorfométricas de microbacias, como a densidade de segmentos de primeira ordem. As ordens Horton foram utilizadas para extração do rio principal de cada microbacia para geração de variáveis como a declividade do rio principal.

Figura 4.2 - Comparação da rede hidrográfica disponibilizada pela Secretaria do Meio Ambiente (SMA) do Estado de São Paulo com a rede hidrográfica elaborada a partir do MDE-SRTM

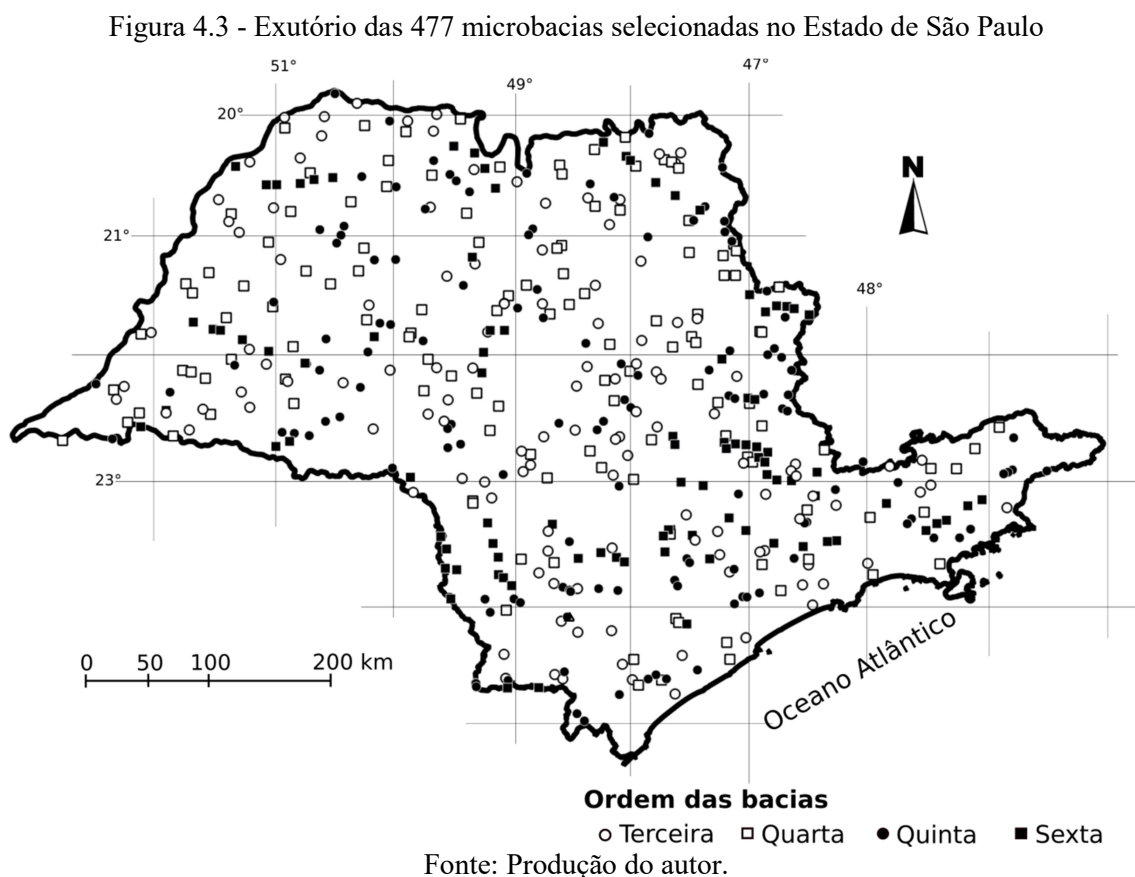


A: distribuição geral da rede hidrográfica localizando as duas áreas (a e b) com densidades de drenagem diferentes; B: visualização ampliada de uma área com presença de linhas retas; C: sobreposição das duas redes hidrográficas para comparação visual.  
 Fonte: Produção do autor.

Os segmentos de drenagem classificados segundo as ordens de Strahler foram utilizados para seleção de microbacias na área de estudo. No total foram selecionadas 520 microbacias de ordens 3 a 6, sendo 130 para cada ordem. Essa seleção foi feita de maneira aleatória considerando todos os pixels rotulados com essas ordens. Considerou-se que essa quantidade de microbacias é satisfatória para representar a área de estudo sem constituir volume excessivo de dados. Microbacias de ordem 1 ou 2 não

foram selecionadas por apresentarem rede hidrográfica limitada e, portanto, mais sujeita a erros. Microbacias de ordens maiores que 6 não foram selecionadas por serem poucas e de ocorrência esparsa. Após verificação visual das 520 microbacias, foram excluídas algumas por que apresentarem inconsistências na hidrografia ou nos divisores de água. Após essa exclusão remaneceram 477 microbacias, sendo 124, 128, 129 e 96 de ordens 3, 4, 5 e 6, respectivamente (Figura 4.3).

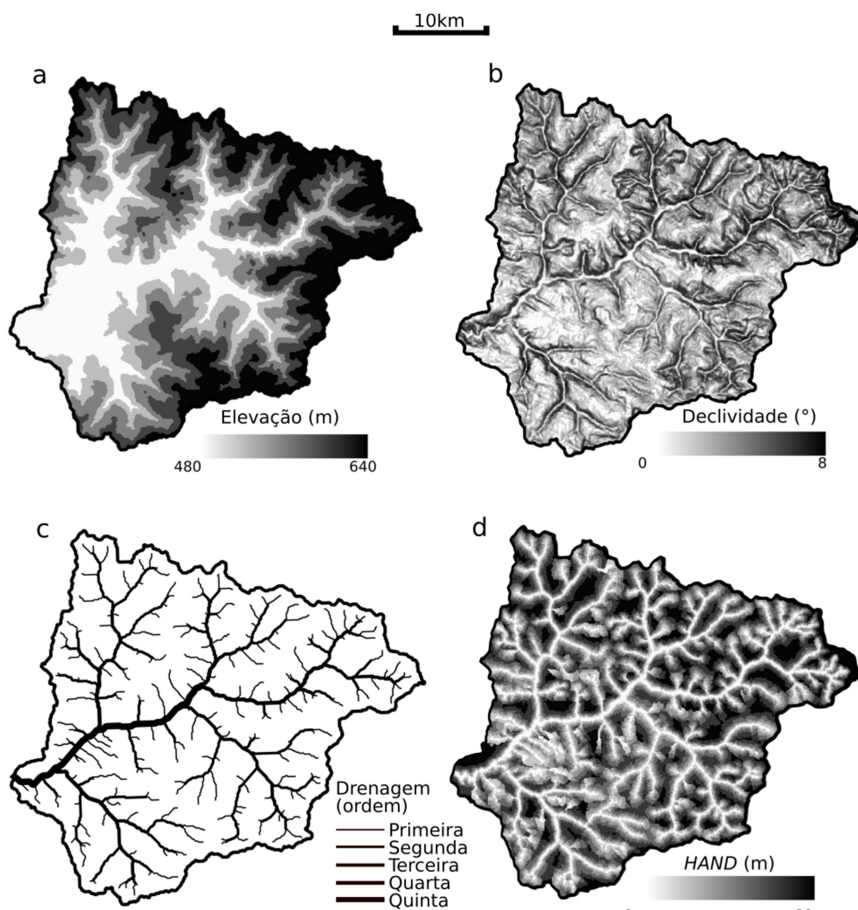
É importante destacar que as principais dificuldades encontradas para a geração da hidrografia e delimitação de microbacias hidrográficas utilizando os diversos aplicativos testados foram o tempo de processamento, a presença de grande número de defeitos, a impossibilidade de automatização da delimitação das microbacias selecionadas e a ausência de classificadores dos segmentos da hidrografia pelos métodos de Horton e Strahler. As ferramentas utilizadas nesse estudo (subitem 4.2) contornaram essas dificuldades de maneira satisfatória.



#### 4.4 Variáveis geomorfométricas de microbacias

Com base na análise de diversas referências bibliográficas, foram selecionadas 74 variáveis geomorfométricas com potencial de relação com os processos geomorfológicos ou hidrológicos das microbacias, sendo 31 planimétricas (Tabela 4.1) e 43 altimétricas (Tabela 4.2). Essas variáveis foram elaboradas a partir das variáveis geomorfométricas básicas de cada uma das microbacias (Figura 4.4). Os algoritmos para essa elaboração estão apresentados no Apêndice A e resumidos na Tabela 4.3.

Figura 4.4 - Variáveis geomorfométricas primárias e hidrografia de uma das microbacias selecionadas



a: MDE; b: declividade; c: rede hidrográfica; e d: *HAND* (*Height above the nearest drainage*).  
Fonte: Produção do autor.

É importante destacar que a declividade dos segmentos de drenagem foi calculada com base na razão entre a amplitude da elevação (elevação máxima menos mínima) e



comprimento do segmento de drenagem. A declividade local (Figura 4.4-c) foi utilizada para estimar as demais variáveis de declividade das microbacias (por exemplo, declividade média).

Para diminuir a assimetria da distribuição de probabilidade das variáveis as seguintes transformações simples foram aplicadas e verificadas:  $\log(x)$ ,  $x^2$ ,  $\sqrt{x}$ ,  $1/\sqrt{x}$ ,  $1/x$ ,  $1/x^2$ . Para avaliar a redução da assimetria na distribuição dos valores por essas transformações foram feitas análises de histogramas antes e depois dessas transformações. A transformação com melhor resultado de simetria foi escolhida. No entanto, quando não houve melhoria na simetria das variáveis, a transformação não foi aplicada, conforme a quarta coluna das Tabelas 4.1 e 4.2. Por fim, para verificar estatisticamente se a distribuição de probabilidade das variáveis transformadas pode ser aproximada a uma distribuição normal foi realizado o teste de normalidade Shapiro-Wilk (ROYSTON, 1995). A distribuição normal das variáveis é importante para os métodos paramétricos, como a análise de correlações e interpolação por krigagem (CHORLEY, 1966; CSILLIK; EVANS; DRĂGUȚ; 2015).

Tabela 4.1 - Variáveis planimétricas (n=31) elaboradas para as microbacias selecionadas do Estado de São Paulo

Abreviação	Variável	Unidade	Trans. <sup>a</sup>	Referência
A	Área da bacia hidrográfica	m <sup>2</sup>	log	Langbein (1947)
Amdo1	Área mediana das sub-bacias de primeira ordem	m <sup>2</sup>	1/x	Horton (1945)
Amo1	Área média das sub-bacias de ordem 1	m <sup>2</sup>	log	Horton (1945)
BL	Comprimento da bacia do exutório ao divisor	m	log	Langbein (1947)
Bo12	Índice bifurcação das sub-bacias de ordem 1 e 2 (nS ordem 1 / nS ordem 2)	-	log	Horton (1945)
Bo23	Índice bifurcação das sub-bacias de 2 e 3 (nS ordem 2 / nS ordem 3)	-	log	Horton (1945)
C	Índice de circularidade (razão entre Área da bacia (A) e área do círculo com mesmo perímetro), variável de forma	-	log	Miller (1953)
CCM	<i>Constant of Channel Maintenance</i> (1/DD)	km	1/x	Schumm (1956)
cE	Índice percentílico de curtose da elevação da bacia hidrográfica	m	-	Evans (1972)
Cpc	Coefficiente de compacidade (razão entre o perímetro da bacia e o diâmetro de um círculo tendo a mesma área da bacia)	-	1/x <sup>2</sup>	Gravelius (1914)
DD	Densidade de drenagem	km <sup>-1</sup>	-	Horton (1932)
DSI	Densidade de segmentos de drenagem	km <sup>-2</sup>	sqrt	Horton (1945)
Dt	Textura da drenagem (DD . DSI)	km	sqrt	Smith (1950)
Elon	Razão de alongação (Diâmetro do círculo com mesma área que a bacia hidrográfica/P)	-	sqrt	Schumm (1956)
FF	Fator forma (A/BL <sup>2</sup> )	-	log	Horton (1932)
Lmn	Razão Lemniscate (BL <sup>2</sup> /4A)	-	log	(Chorley, 1957)
LMS	Comprimento da drenagem principal	m	log	(Eash, 1994)
LS	Comprimento total da drenagem	m	log	Horton (1945)
LSo21	Comprimento médio dos segmentos de drenagem de ordem 2 sobre o comprimento médio dos de ordem 1	-	log	Horton (1945)
LSo32	Comprimento médio dos segmentos de drenagem de ordem 3 sobre o comprimento médio dos de ordem 2	-	log	Horton (1945)
LSP	Razão comprimento-perímetro (LS/P)	-	log	Melton (1958)
mB	Índice de bifurcação médio da bacia hidrográfica (Média (n° de segmentos de ordem x/ número de segmentos de ordem x+1))	-	1/x <sup>2</sup>	Horton (1945)
MCS	Sinuosidade da drenagem principal (LMS/BL)	-	sqrt	Eash (1994)
mLS	Comprimento médio dos segmentos de drenagem da bacia hidrográfica	m	log	Horton (1945)
MSS	Relação entre comprimento da drenagem principal e comprimento total da drenagem (LMS/LS)	-	log	Modificado de Warner (2003)
no1A	Número de segmentos de drenagem de ordem 1 sobre a área	m <sup>-2</sup>	log	Horton (1945)
nS	Número de segmentos de drenagem da bacia hidrográfica	-	log	Horton (1945)
O	Ordem	-	log	(Strahler, 1964)
P	Perímetro da bacia hidrográfica	m	log	Eash (1994)
RD	Densidade relativa (DSI / DD <sup>2</sup> )	-	log	Melton (1958)
Texrt	Razão textura (nS/P)	m <sup>-1</sup>	log	Melton (1958)

<sup>a</sup>Transformação aplicada as variáveis para diminuir a assimetria de suas distribuições de probabilidade

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.2 - Variáveis altimétricas (n=43) elaboradas para as microbacias selecionadas do Estado de São Paulo

Abreviação	Variável	Unidade	Tran. <sup>a</sup>	Referência
cE	Índice percentílico de curtose da elevação da bacia hidrográfica	m	-	Evans (1972)
cSl	Índice percentílico de curtose da declividade da bacia hidrográfica	grau	x <sup>2</sup>	Evans (1972)
cvE	Coefficiente de variação da elevação bacia hidrográfica	m	log	Estatística simples
cvH	Coefficiente de variação da altura da bacia hidrográfica	m	log	Estatística simples
cvSl	Coefficiente de variação da declividade da bacia hidrográfica	grau	1/x	Estatística simples
ER	Coefficiente elevação-relevo ((mE-minE)/(maxE-minE))	-	-	Pike e Wilson (1971)
f10Sl	Proporção de área com declividade menor que 10 graus	-	x <sup>2</sup>	Warner (2003)
f4Sl	Proporção de área com declividade menor que 4 graus	-	-	Warner (2003)
f7Sl	Proporção de área com declividade menor que 7 graus	-	x <sup>2</sup>	Warner (2003)
fHd10	Proporção de área com <i>HAND</i> <sup>b</sup> menor que 10 m	-	-	
fHd15	Proporção de área com <i>HAND</i> menor que 15 m	-	log	
Hyp	Integral hipsométrica	-	-	Langbein (1947)
Hyp1	Porcentagem de mudança entre os pontos 0,25 e 0,75 de curva hipsométrica	-	sqrt	Warner (2003)
Hyp2	Hyp1/A	m <sup>-2</sup>	log	Warner (2003)
Hyp3	Hyp1/(Porcentagem de mudança entre os pontos 0,50 e 0,75 de curva hipsométrica)	%	1/x <sup>2</sup>	Warner (2003)
maxE	Elevação máxima da bacia hidrográfica	m	log	Price et al. (2011)
maxHd	<i>HAND</i> máximo	m	log	
maxSl	Declividade máxima da bacia hidrográfica	grau	sqrt	Price et al. (2011)
maxSlS	Máxima declividade dos segmentos de rios de ordem igual ou maior que três	grau	log	Modificado de Warner (2003)
mdE	Elevação mediana da bacia hidrográfica	m	-	Price et al. (2011)
mE	Elevação média da bacia hidrográfica	m	log	Fitzpatrick et al. (1998)
mH	Altura média da bacia hidrográfica (Altura em relação ao exutório)	m	log	Mark (1975)
mHd	<i>HAND médio</i>	m	log	
mHd10	Média do <i>HAND</i> menor que 10 m	m	log	
minE	Elevação mínima da bacia hidrográfica	m	-	Fitzpatrick et al. (1998)
mSl	Declividade média da bacia hidrográfica	°	log	Mark (1975)
mSlHd10	Declividade média da área com <i>HAND</i> menor que 10 m	grau	log	
mSlol	Declividade média dos segmentos de drenagem de ordem 1	grau	log	Horton (1945)
mSlS	Declividade média dos segmentos de drenagem	grau	log	Horton (1945)
OC	Coefficiente Orográfico ER . (mE-minE)	-	log	Chistofolletti (1980)
p90SlHd10	Percentil 90 da declividade da área com <i>HAND</i> menor que 10	grau	log	
Pd	Predominância (mE-(minE+maxE)/2 )	m	x <sup>4</sup>	Muñoz (2009)
RI	Amplitude da bacia hidrográfica (maxE-minE)	-	log	Strahler (1958)
RIrt	Razão relevo (RI/BL)	-	log	Schumm (1956)
rRI	Relevo relativo (RI/P)	-	log	Schumm (1956)
Rug	Índice de rugosidade da bacia hidrográfica (RI . DD)	-	log	Melton (1958)
Rug2	Índice de rugosidade da bacia hidrográfica com modificações: produto entre DD e mHd, com ambas as variáveis transformadas para uma mesma variância	-	log	Modificado de Melton (1958)
sdE	Desvio padrão da elevação da bacia hidrográfica	m	log	Evans (1972)
sdH	Desvio padrão da altura da bacia hidrográfica	m	log	Evans (1972)
sdSl	Desvio padrão da declividade da bacia hidrográfica	grau	log	Grohmann et al. (2011)
SIMS	Declividade da drenagem principal	grau	log	Langbein (1947)
Slrt1	Razão declividade modificado (mSlS/fHd10)	-	-	Modificado de Eash (1994)
Slrt2	Razão declividade (mSlS/mSl)	-	log	Eash (1994)

<sup>a</sup>Transformação aplicada as variáveis para diminuir a assimetria de suas distribuições de probabilidade

<sup>b</sup>Height Above the Nearest Drainage (*HAND*).

Fonte: Produção do autor.

Tabela 4.3 - Resumo dos códigos desenvolvidos para processamento das microbacias da área de estudo e geração das variáveis geomorfométricas

Código*	Título	Principais	Entrada	Saída	Observações
A1	Delimitação de microbacias	r.water.outlet e r.to.vect	Coordenadas dos exutórios e direção de fluxo	limites (bordas) das microbacias no formato shapefile	As principais ferramentas utilizadas foram do GRASS GIS. Foram criados dois tipos de arquivos em shapefile: com e sem suavização das bordas
A2	Conversão de vetor para raster	extent, rasterize e raster	microbacias no formato shapefile	microbacias no formato raster	As ferramentas extent e raster foram utilizadas com o objetivo de gerar resultados com uma mesma resolução espacial
A3	Operação de sobreposição entre a rede de drenagem e os limites de cada microbacia	crop, extent e interseção (multiplicação)	rede de drenagem de toda a área e limite das microbacias	Drenagem para cada microbacia no formato raster	As ferramentas crop e extent foram utilizadas para eliminar valores nulos além do quadrante que recobre cada microbacia
A4	Individualização dos canais de mesma ordem Strahler, para geração de um arquivo para cada ordem e microbacia	reclassify e writeRaster	Drenagens de cada microbacia	Drenagem de cada ordem de cada microbacia	Esse processo foi elaborado para conversão posterior dos canais para o formato shapefile. A conversão sem a individualização estava sujeita a muitos erros grosseiros na drenagem resultante
A5	Conversão de raster para shape	r.to.vect e v.out.ogr	Drenagens de cada ordem de cada microbacia no formato raster	Drenagem de cada ordem de cada microbacia no formato shapefile	Foram utilizadas ferramentas do GRASS
A6	Localização do exutório e do ponto mais distante do exutório; distância entre o exutório e o ponto mais distante do exutório, elevação do exutório e elevação do ponto mais distante do exutório	sqrt e which.max	Fluxo acumulado, MDE e limite das microbacias	Planilha com valores calculados para cada microbacia	Considerou-se o exutório como o ponto com maior fluxo acumulado
A7	Extração do canal principal das microbacias	cellStats e reclassify	Drenagem classificada	Canal principal de cada microbacia	A rede de drenagem utilizada foi classificada pelo método de Horton (1945), que classifica a drenagem principal como a ordem de maior valor

continua

Tabela 4.3 - Conclusão

A8	Obtenção da ordem de cada microbacia	<i>cellStats</i>	Drenagem de cada microbacia classificada segundo Strahler	Planilha com as ordens de cada microbacia	A ordem da microbacia é determinada de acordo com a ordem Strahler dos canais mais elevada
A9	Cálculo de área e perímetro das microbacias	<i>gLength</i> e <i>gArea</i>	Limite das microbacias em shapefile	Planilha com a área e o perímetro de cada microbacia	O perímetro e área foram calculados com os shapefiles das microbacias com bordas suavizadas
A10	Comprimento médio e declividade média dos canais de cada ordem	<i>gLength</i> e <i>rasterize</i>	MDE, drenagem em shapefile e microbacias no formato raster	Planilha com os valores calculados para cada microbacia	A declividade média é obtida pela relação entre amplitude da elevação do canal e seu comprimento
A11	Variáveis a partir do <i>HAND</i>	<i>cellStats</i> e <i>reclassify</i>	<i>HAND</i> , declividade e limite das microbacias em raster	Planilha com os valores calculados para cada microbacia	-
A12	Contagem do número de canais de cada ordem	<i>reclassify</i> e <i>aggregate</i>	Drenagem classificada segundo Strahler, drenagem com identificadores dos canais (Ambas foram geradas no GRASS GIS) e limite das microbacias em raster	Planilha com os valores calculados para cada microbacia	-
A13	Área média das sub-microbacias de primeira ordem de cada microbacia	<i>reclassify</i> e <i>aggregate</i>	Fluxo acumulado, drenagem com identificação dos canais e drenagens de cada microbacia classificada pelo método de Strahler	Planilha com os valores calculados para cada microbacia	-
A14	Cálculo de diversas variáveis de microbacias a partir do MDE e da declividade	<i>quantile</i> e <i>mean</i>	MDE, declividade e limite das microbacias	Planilha com os valores calculados para cada microbacia	-
A15	Definição dos centroides das microbacias	<i>median</i>	MDE, declividade e limite das microbacias	Planilha com os valores calculados para cada microbacia	-

\*As linhas de comando dos códigos estão no Apêndice A

#### **4.5 Seleção das variáveis geomorfométricas**

O alto número de variáveis planimétricas (Tabela 4.1) e altimétricas (Tabela 4.2) na literatura torna inviável a análise detalhada de todas elas. Como muitas dessas variáveis expressam características que estão estreitamente ligadas entre si, é de se esperar que grande parte dessas variáveis estejam correlacionadas (APÊNDICE B). Assim, se faz pertinente a redução no número de variáveis com vista a expressar uma proporção dominante da variação estatística dos dados e, ao mesmo tempo, representar as diferentes características das microbacias, como sua forma, relevo, tamanho e hidrografia.

Para examinar o padrão geral de intercorrelação das 74 variáveis geomorfométricas visando identificar um conjunto reduzido de variáveis que descrevem a maior parte da variação estatística dos dados, foi empregada a análise de componente principal (PCA), a partir da matriz de correlação de dimensão 74x74. A PCA foi realizada utilizando a matriz de correlação ao invés da matriz de covariância, porque o único objetivo foi o de examinar a relação entre variáveis e não o agrupamento de microbacias (OLDEN; POFF, 2003).

Essa seleção de variáveis também se apoiou na análise da matriz de correlação das variáveis, que permitiu uma avaliação mais específica da redundância das variáveis que a PCA. Portanto os grandes grupos de variáveis intercorrelacionadas foram identificados pela PCA e a correlação entre as variáveis dentro dos grupos foram examinadas pela matriz de correlação. Por fim, também foi realizada análise visual da distribuição das variáveis geomorfométricas, principalmente para aquelas que apresentaram comportamento mais isolado em relação às demais. Isto foi feito para analisar se o padrão de suas distribuições possui relação com as características da área de estudo.

#### **4.6 Análise geoestatística e interpolação**

A distribuição espacial das variáveis geomorfométricas selecionadas foi analisada por meio de semivariogramas. Essa análise permite perceber se as variáveis apresentam dependência espacial e se podem formar grupos regionalmente contíguos. Os modelos esférico, gaussiano e exponencial foram considerados para modelagem da curva do

variograma teórico. O melhor modelo foi escolhido por meio da comparação visual entre o variograma experimental e teórico. Após essa análise as variáveis foram interpoladas por krigagem considerando os parâmetros definidos pelos semivariogramas.

As principais razões para a interpolação das variáveis geomorfométricas devem-se ao não recobrimento/preenchimento de toda a área de estudo pelas microbacias selecionadas e ao ganho na capacidade de reconhecimento de padrões espaciais sob o formato *raster*. Isto porque as variáveis geomorfométricas de microbacias são representadas por polígonos (divisores de águas) ou pontos (exutório ou centroide da bacia) distribuídos de forma irregular na área de estudo, sendo difícil de identificar e comparar padrões espaciais, ou regiões com características homogêneas, por meio da análise desses vetores.

#### **4.7 Classificação das variáveis geomorfométricas**

Para definição das regiões com características homogêneas, cada variável geomorfométrica foi agrupada pelo método k-médias e depois classificadas de acordo com os valores médios dos grupos. Este método de agrupamento tem se mostrado útil para discriminar objetos do meio físico, como unidades de relevo (WENDEL; BUTTENFIELD; STANISLAWSKI, 2016). K-médias é um método paramétrico e não-supervisionado, que se tornou popular por sua estrutura simples. Esse método se baseia na distância de cada observação ao centroide de cada grupo (BRAMER, 2007). Os centroides são alocados o mais distante possível. A observação é associada ao grupo com centroide mais próximo.





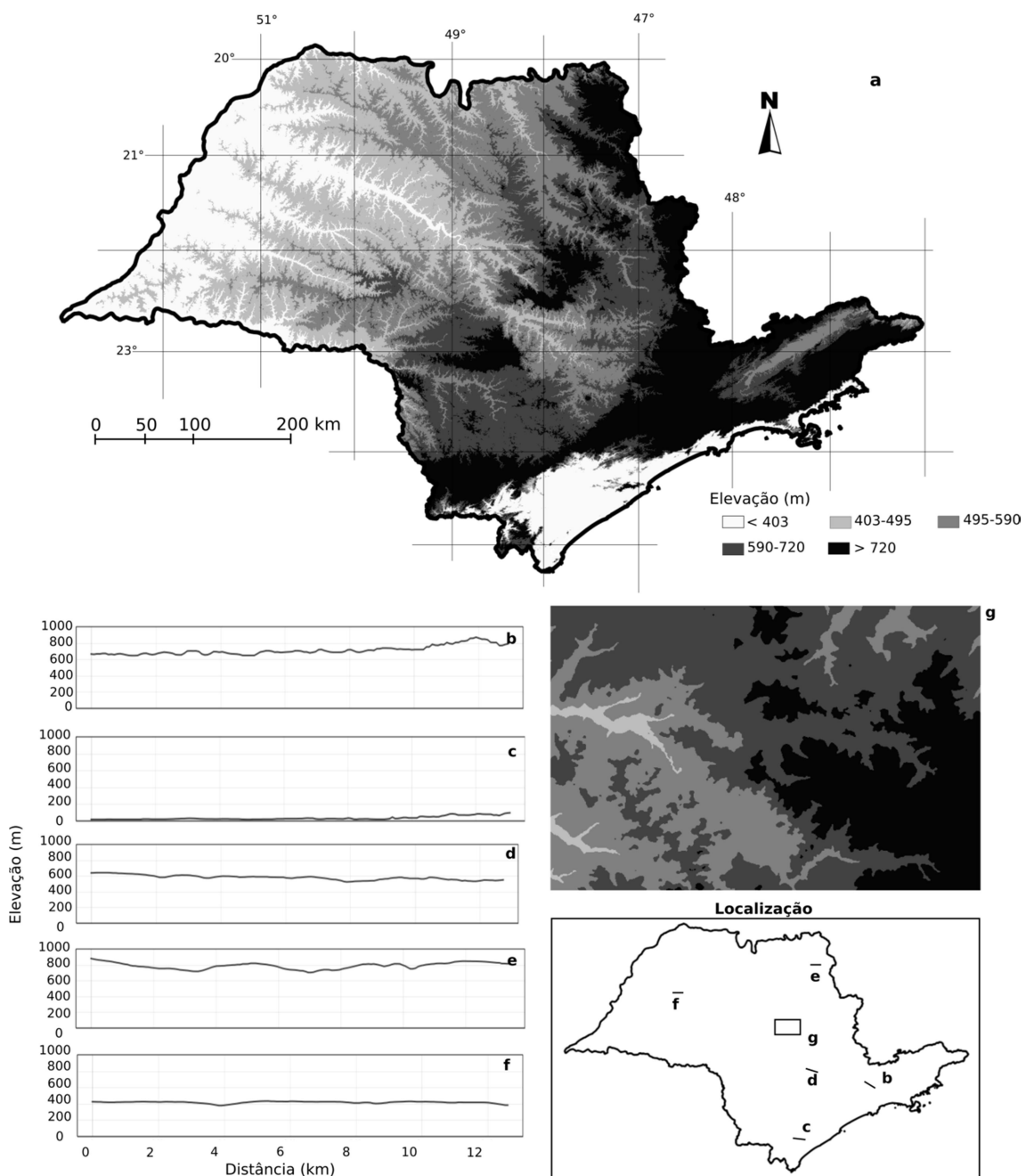
## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Apresentação das variáveis geomorfométricas primárias e da rede hidrográfica

As três variáveis geomorfométricas primárias MDE, declividade e *HAND* são apresentadas por meio de mapas e transectos (Figuras 5.1 a 5.3). O valor mediano e o valor máximo do MDE, da declividade e do *HAND* para a área são 541m e 2763m, 7,6° e 87,0°, 17 m e 240m, respectivamente. O 10° (décimo) e 90° (nonagésimo) percentil do MDE, da declividade e do *HAND* para a área são 356m e 812m, 3,1° e 27°, 0,1m e 70m, respectivamente, significando que 80% da área está dentro dessas faixas de valores (entre o 10° e o 90° percentil). A distribuição geral dos valores do MDE, da declividade e do *HAND* pode ser observada por meio de seus histogramas (Figura 5.4).

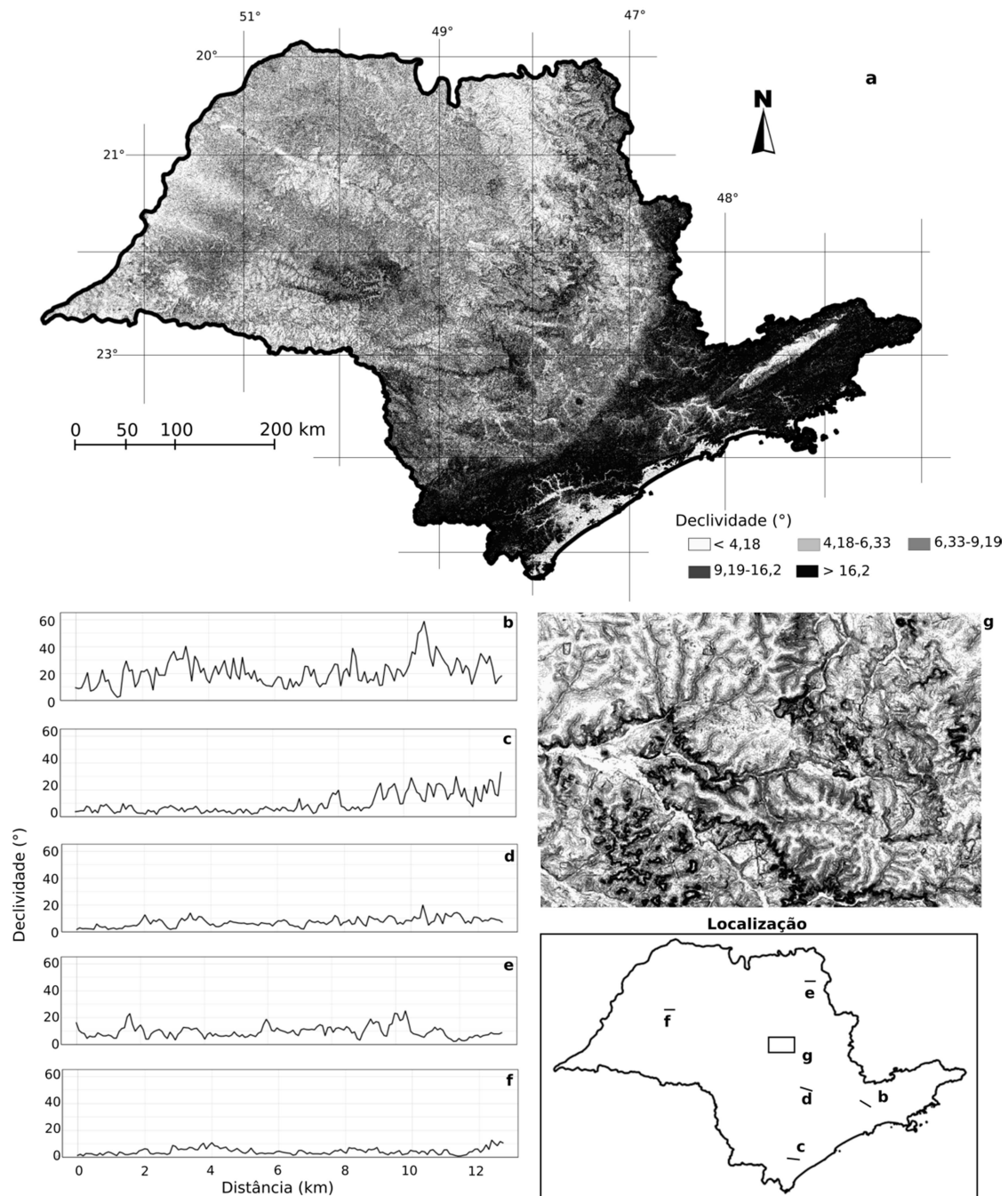
As variações altimétricas do Estado de São Paulo evidenciadas pelo MDE e pelos transectos (Figura 5.1) destacam as calhas e os vales formados pelos principais rios, e também as grandes estruturas elevadas no cristalino e nos derrames basálticos. As áreas mais elevadas encontram-se no Planalto Atlântico e nas Cuestas Basálticas, e as menos elevadas nas duas extremidades leste-oeste, localizadas nas planícies das Províncias Costeiras e nas aproximações dos grandes rios (Tietê, São José dos Dourados, Aguapeí e do Peixe) com o Rio Paraná. Pela distribuição da declividade (Figura 5.2) percebe-se grande contraste entre o Planalto Atlântico e a Depressão Periférica formando um arco, e também os paredões das cuestas que possuem declividade alta em relação às paisagens vizinhas. As áreas mais planas estão nas grandes áreas de deposição recente, mais evidentemente nas planícies da Província Costeiras, no vale do Paraíba, na Planície do Campo de Araçatuba, e nas planícies do Rio Pardo. As áreas mais inclinadas são as Serra do Mar e Paranapiacaba nas Províncias Costeiras, a serra da Mantigueira no Planalto Atlântico e, em menor proporção, nas zonas cuestiformes da Depressão Periférica e das Cuestas Basálticas. O *HAND*, quando observado em detalhe, permite identificar as planícies de inundação e as áreas que estão sob pouca influência dos rios (topos de morros) nos interflúvios (Figura 5.3). Quando observado de maneira geral (toda a área), o *HAND* assume padrão visual similar ao da declividade, mas permitindo visualizar com maior destaque os grandes rios, enquanto que a declividade destaca as planícies e as áreas que contrastam com elas.

Figura 5.1 - Representação geral do MDE (a), transectos (b, c, d, e, f) e visualização em detalhe (g), a partir dos dados Topodata-SRTM para o Estado de São Paulo



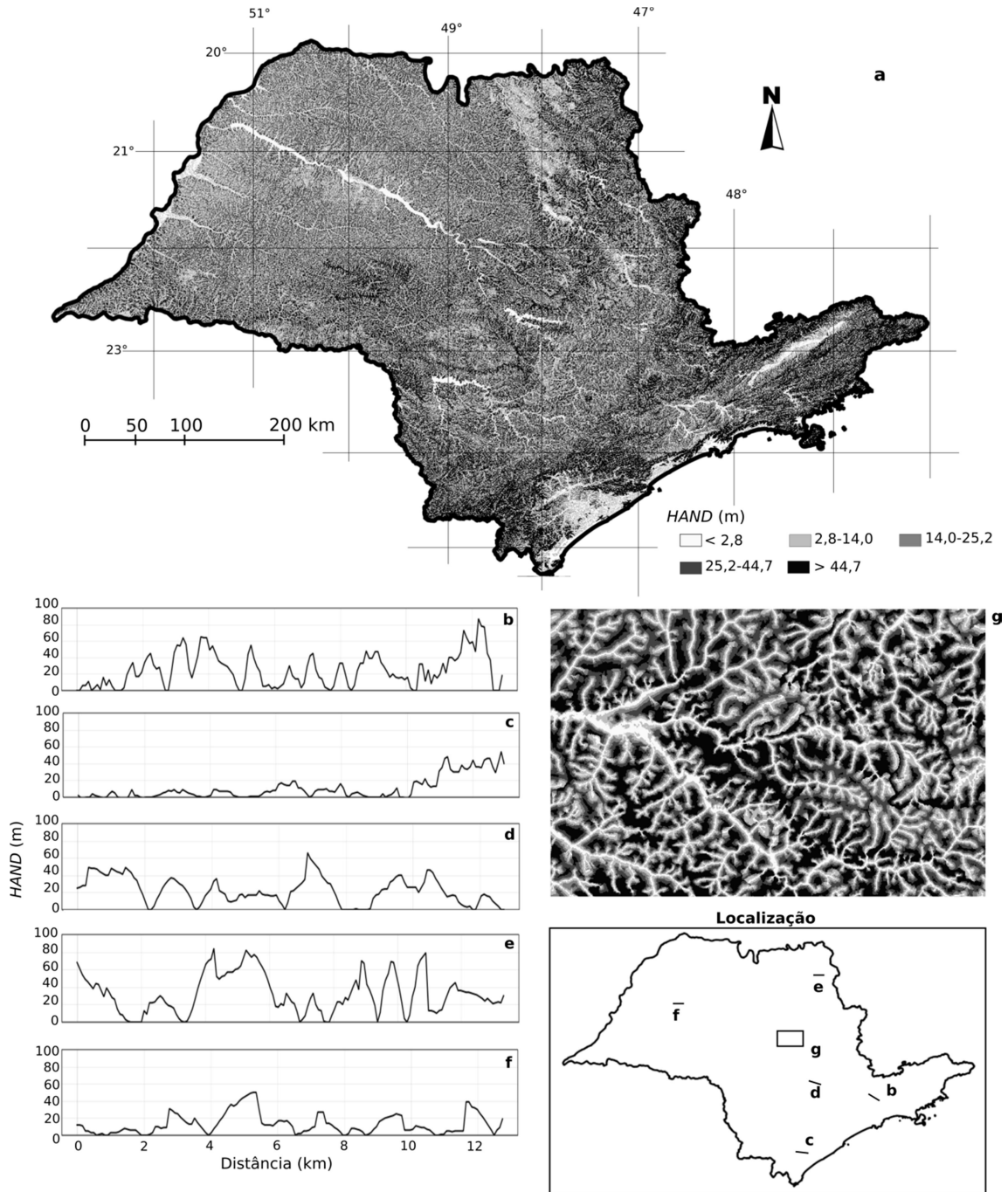
Cada classe da legenda possui a mesma extensão geográfica no Estado de São Paulo. Os transectos foram gerados no sentido leste-oeste.  
 Fonte: Produção do autor.

Figura 5.2 - Representação geral do declividade (a), transectos (b, c, d, e, f) e visualização em detalhe (g), a partir dos dados Topodata-SRTM para o Estado de São Paulo



Cada classe da legenda possui a mesma extensão geográfica no Estado de São Paulo. Os transectos foram gerados no sentido leste-oeste.  
 Fonte: Produção do autor.

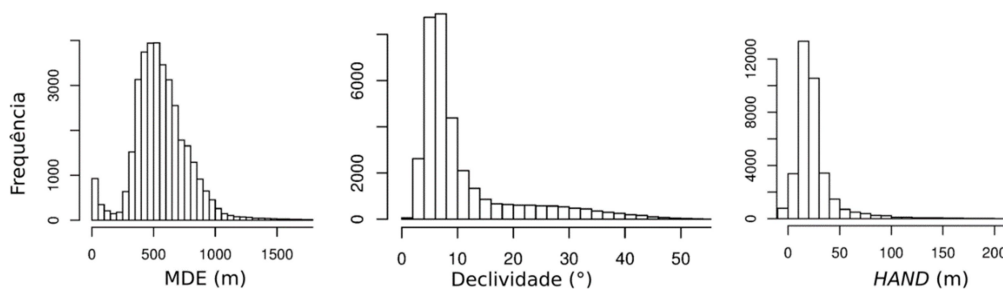
Figura 5.3 - Representação geral do *HAND* (a), transectos (b, c, d, e, f) e visualização em detalhe (g), a partir dos dados Topodata-SRTM para o Estado de São Paulo



Cada classe da legenda possui a mesma extensão geográfica no Estado de São Paulo. Os transectos foram gerados no sentido leste-oeste.

Fonte: Produção do autor.

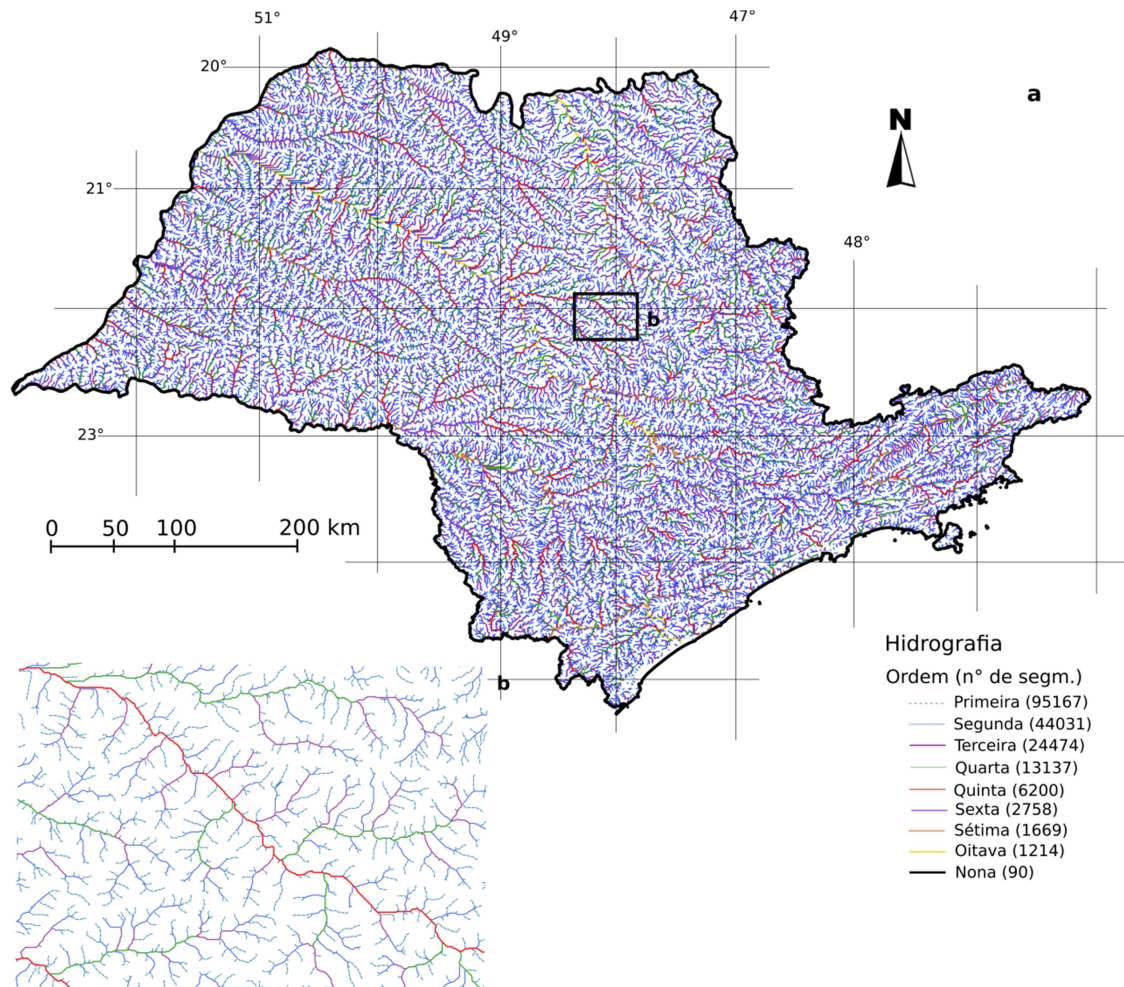
Figura 5.4 - Histogramas do MDE, da declividade e do *HAND* para o Estado de São Paulo



Fonte: Produção do autor.

A análise visual da distribuição da rede hidrográfica gerada (Figura 5.5) permitiu concluir que sua qualidade é satisfatória em relação à hidrografia digital disponibilizada pela SMA (Subitem 4.3). A rede hidrográfica gerada mostrou representar uma rede de drenagem factível e com pouca presença de defeitos, como a presença linhas artificiais nos lagos e grandes rios, e drenagens retas e paralelas nas áreas planas. A aplicação de um único limiar no fluxo acumulado para extração de toda a hidrografia para a área de estudo (Subitem 3) permitiu a geração de uma hidrografia unificada. No entanto, em trabalhos futuros recomenda-se a avaliação de métodos de extração de drenagem com os quais os limiares se ajustam de acordo com diversas características do terreno (subitem 2.3). Esses métodos possuem uma base teórica bem fundamentada (BANON, 2013; HEINE; LANT; SENGUPTA, 2004), mas demandam maiores quantidades de dados e de tempo de processamento para sua execução. Os procedimentos e softwares adotados nesse estudo para geração da rede hidrográfica e para a delimitação de microbacias foram mais eficazes que outros testados considerando os seguintes aspectos: tempo de processamento, quantidade de defeitos na hidrografia, capacidade de automatização da delimitação das microbacias selecionadas e a possibilidade de classificação dos segmentos da hidrografia pelos métodos de Strahler (1957) e de Horton (1945).

Figura 5.5 - Rede hidrográfica, visualização geral (a) e em detalhe (b), elaborada a partir dos dados Topodata-SRTM para o Estado de São Paulo



A classificação dos segmentos de hidrografia foi realizada pelo método de Strahler (STRAHLER, 1957).

Fonte: Produção do autor.

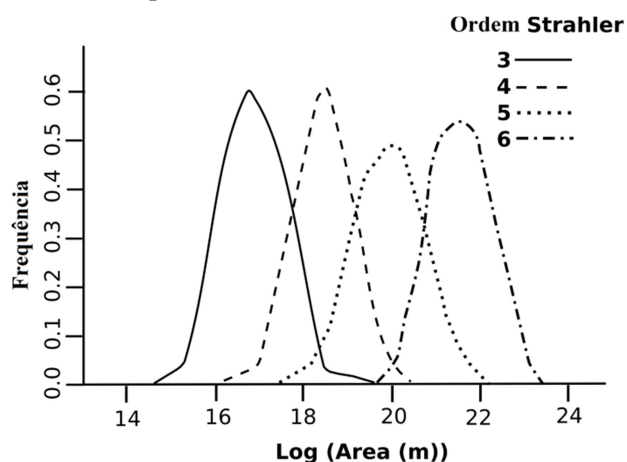
## 5.2 Variáveis geomorfométricas de microbacias

A partir das variáveis geomorfométricas primárias e da hidrografia, foram obtidas 74 variáveis geomorfométricas (Tabelas 4.1 e 4.2) para as 477 microbacias da área de estudo. Os algoritmos de obtenção estão apresentados no Apêndice A. Essas variáveis são descritores que resumem, em um único valor, características como forma, tamanho, relevo ou a estrutura da rede hidrográfica de cada microbacia. A apresentação dos resultados de todas essas variáveis para todo o conjunto de dados seria muito extensa e fora do escopo desse estudo. Por isso, apresentam-se aqui apenas algumas das características mais relevantes dessas variáveis.

### 5.2.1 Aspectos gerais

O tamanho das microbacias variou de 4,7 a 8.806,8 km<sup>2</sup>, com tamanho médio de 884,5 km<sup>2</sup>. São 124, 128, 129 e 96, totalizando 477 microbacias para as ordens 3, 4, 5 e 6, respectivamente. A variação das áreas de microbacias em relação às respectivas ordens encontra-se na Figura 5.6. Microbacias de maior ordem geralmente possuem áreas maiores que as de microbacias de menor ordem, mas com considerável número de exceções para microbacias com ordens relativamente próximas hierarquicamente. Por exemplo, existem casos em que uma microbacia de ordem 3 possui área similar a de uma microbacia de ordem 5 (Figura 5.6).

Figura 5.6 - Frequência (densidade) do logaritmo da área das microbacias selecionadas do Estado de São Paulo para cada ordem Strahler

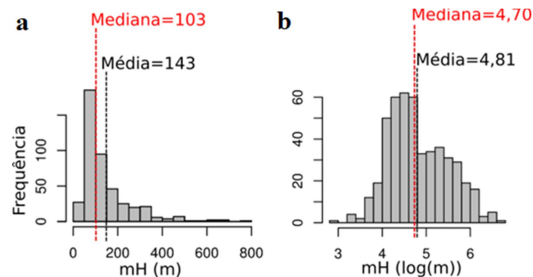


Fonte: Produção do autor.

Diversas variáveis geomorfométricas de microbacias apresentaram distribuição assimétrica, ou seja, distribuição notavelmente distinta da normal. As transformações descritas (Tabelas 4.1 e 4.2) mostraram-se pertinentes, uma vez que reduziram a assimetria das variáveis e favoreceram as análises paramétricas dos dados (CHORLEY, 1966; CSILLIK; EVANS; DRĂGUȚ; 2015). Um exemplo pode ser observado por meio de estatísticas da variável mH (altura média da microbacia) antes e após a transformação (Figura 5.7). Antes da transformação logarítmica a distribuição se mostra com assimetria positiva, com média e mediana distantes entre si, sendo a média influenciada pelos valores altos da cauda da distribuição. Após transformação, a

distribuição se torna menos assimétrica, conseqüentemente sua média e mediana apresentam-se menos distantes entre si.

Figura 5.7 - Histogramas, média e mediana da variável mH (altura média de todos os pixels em relação ao exutório da microbacia) para as microbacias selecionadas do Estado de São Paulo; sem (a) e com (b) transformação logarítmica

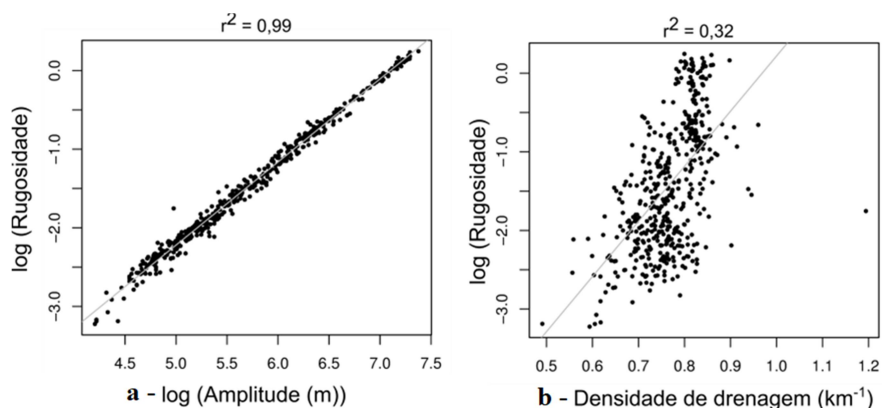


Fonte: Produção do autor.

As variáveis geomorfométricas compostas, ou seja, formadas pela combinação de duas ou mais, apresentaram limitação quando as variáveis que as compõem não tiveram mesma amplitude de variação ou mesma variância. A variável composta tende a herdar preponderantemente as características estatísticas da variável com maior variância. O índice de rugosidade, formado pelo produto de amplitude (diferença entre elevação máxima e mínima) e densidade de drenagem, é um exemplo. A variação da amplitude para as microbacias da área de estudo é de 67m a 1600m (variância=127191), a variação da densidade de drenagem é de 0,49 a 1,2km<sup>-1</sup> (variância=0,004). O índice de rugosidade apresentou uma relação de dependência com a amplitude de 99% (r<sup>2</sup>) (Figura 5.8). Com isso, pode-se afirmar que o índice de rugosidade foi determinado somente em função de valores da amplitude, quando se espera que ele seja função de ambas as variáveis, amplitude e densidade de drenagem. Assim como para o índice de rugosidade, isto ocorre para as outras variáveis geomorfométricas compostas (Tabela 4.1 e 4.2).



Figura 5.8 - Relação entre rugosidade (original) e amplitude (a) e entre rugosidade e densidade de drenagem (b) utilizando as microbacias selecionadas do Estado de São Paulo



Fonte: Produção do autor.

Para que as variáveis geomorfológicas compostas sejam função de todas as variáveis que a compõem, se fez necessário uma transformação prévia no sentido de igualar as variâncias destas variáveis. Para exemplificar, é proposto neste estudo um índice de rugosidade modificado, com vista sua melhoria sob três aspectos ou condições:

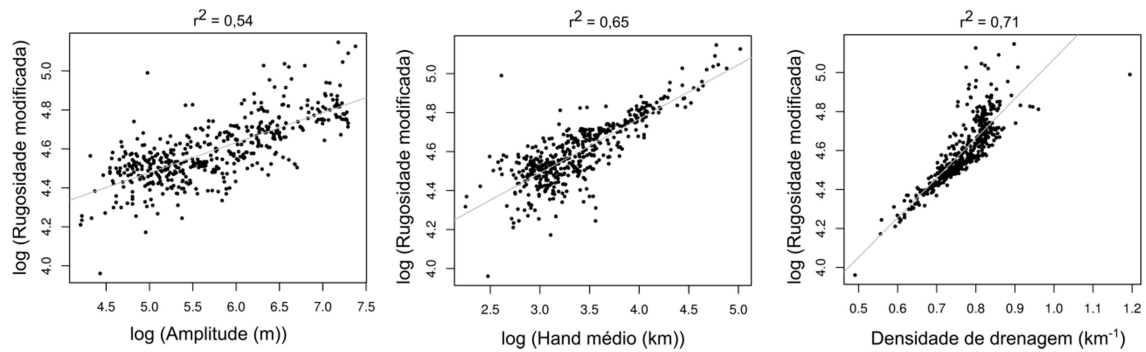
- (1) que as variáveis que compõem a rugosidade tenham pesos equilibrados sob a rugosidade, evitando que sua magnitude seja em função de uma ou da outra variável unicamente;
- (2) que a variável substituta represente melhor todo o relevo microbacia do que a amplitude, que é formada pela diferença de dois valores extremos da elevação da microbacia (máximo e mínimo); e
- (3) que a variável substituta apresente menor dependência em relação à escala do que a amplitude. A dependência em relação à escala é explicada adiante e pode ser analisada pela matriz de coeficientes de determinação no Apêndice B.

Para satisfazer a primeira condição (1) ambas as variáveis que compõem a rugosidade modificada foram transformadas, resultando em igualdade de variâncias. Ao invés da amplitude, foi utilizado o *HAND* médio da microbacia, que é o valor médio das alturas de todos os pixels em relação à sua drenagem mais próxima. O *HAND* médio satisfaz as duas últimas condições (2 e 3).

As relações da rugosidade modificada com a amplitude, a densidade de drenagem e o *HAND* médio são apresentados por meio de diagramas de dispersão na Figura 5.9.

Observa-se que a rugosidade modificada mostrou-se (estatisticamente) como uma função de ambas as variáveis usadas no seu cálculo.

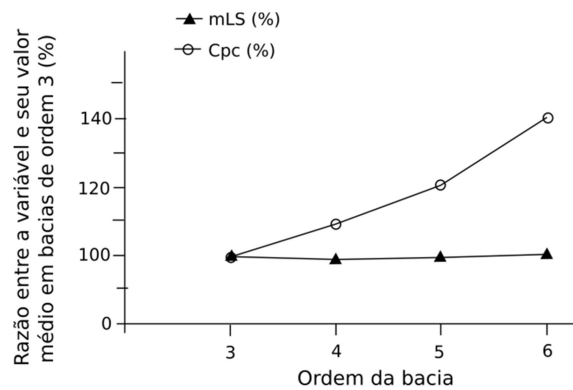
Figura 5.9 - Relação entre rugosidade modificada e amplitude, entre rugosidade modificada e *HAND* médio e entre rugosidade modificada e densidade de drenagem



Fonte: Produção do autor.

Algumas variáveis geomorfométricas apresentaram dependência em relação à escala, ou seja, notou-se certa tendência de seus valores variarem em função da área das microbacias. A dependência em relação à escala é bastante estudada considerando a variação de determinada variável em função do tamanho do pixel, sendo considerado um problema para muitas análises geomorfométricas (SHARY; SHARAYA; MITUSOV, 2002). A relação de dependência, aqui verificada, é fator limitante em comparações de microbacias de diferentes tamanhos ou ordens, pois é mais difícil de determinar em uma relação de causa e efeito se a variação é devido a variável propriamente dita ou devido a diferenças de tamanho entre as microbacias analisadas. O coeficiente de compacidade (Cpc) e o tamanho médio dos segmentos de drenagem (mLS) são exemplos de variáveis em que se verificam dependência e independência de escala, respectivamente (Figura 5.10). No subitem a seguir, a dependência de escala é verificada para todas as variáveis da área de estudo.

Figura 5.10 - Variação do valor médio das variáveis mLS (comprimento médio dos segmentos de drenagem) e Cpc (índice de compactade) em função da ordem das microbacias



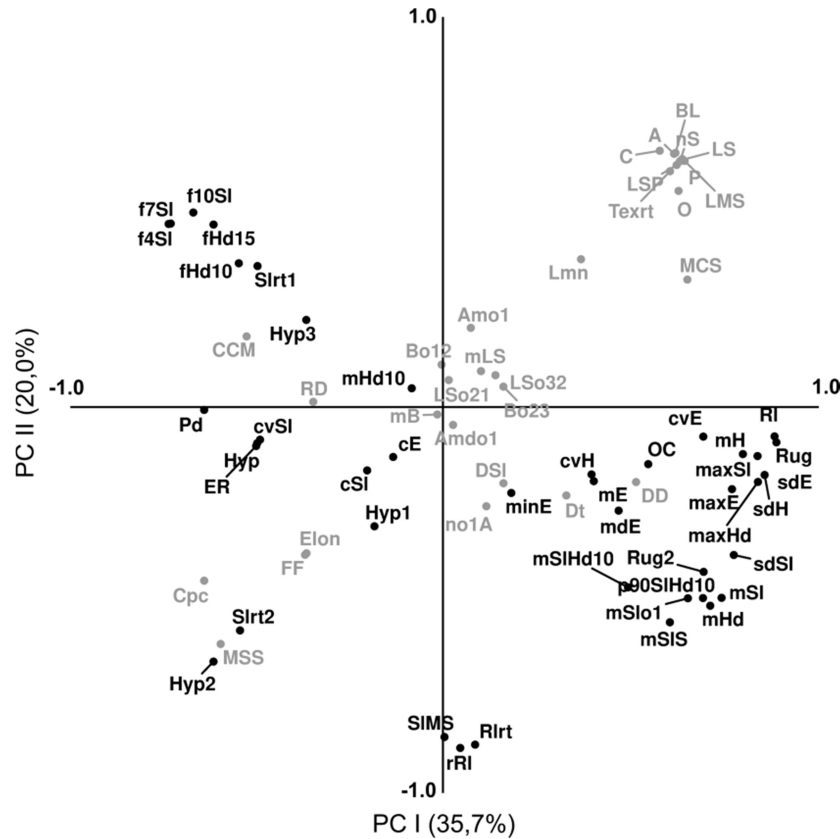
Fonte: Produção do autor.

### 5.2.2 Padrão geral de redundância e seleção

Verificou-se, por meio da análise da matriz de coeficientes de determinação ( $r^2$ ) (Apêndice B) e da correlação das variáveis com a primeira e segunda componentes principais dos dados (Figura 5.11), a presença de grupos de variáveis intercorrelacionadas. O grupo mais proeminente é formado pelas variáveis que descrevem a declividade (mSl, mSlS, f4Sl...), a rugosidade (Rug, Rug2, sdH, sdE...) e a altura (elevação em relação ao nível do mar subtraída da elevação do exutório ou da drenagem mais próxima) das microbacias (mH, mHd, maxHd...). Esse grupo é formado por aproximadamente 20 variáveis, que apresentam coeficiente de determinação ( $r^2$ ) entre pares de variáveis que o constitui superior a 0,5. Outro grupo de grande destaque é formado pelas variáveis que estão correlacionadas com a área (A) da microbacia. Treze variáveis que pertencem a este grupo (LS, nS, P, C, LPS, LMS, BL, Hyp2, MSS, Text, O, Slrt2, Cpc e MCS) apresentaram  $r^2$  maior que 0,55 em relação à área da microbacia.

Os dois agrupamentos descritos acima são os maiores, os demais são constituídos de 5 ou menos variáveis. Dentre as 5 variáveis que descrevem forma da microbacia (C, Cpc, FF, Elon e Lmn), a FF, a Elon e a Lmn formam grupo altamente intercorrelacionado, as outras duas estão correlacionadas com a área da microbacia. As variáveis Hyp, ER e Pd formam outro grupo, sendo o  $r^2$  entre Hyp e ER de 0,99 e entre Hyp e Pd de 0,7. As variáveis SIMS, rRl e Rlrt formaram outro grupo com  $r^2$  entre pares de variáveis maior que 0,7. Semelhantemente, as variáveis mE, mdE e minE e as variáveis mLS, DSl e No1A formaram outros dois grupo com  $r^2$  entre pares de variáveis maior que 0,7.

Figura 5.11 - Correlação (r) das 74 variáveis com a primeira (PC I) e com a segunda (PC II) componentes principais obtidas a partir das microbacias selecionadas do Estado de São Paulo



As variáveis apresentadas em preto são variáveis altimétricas e em cinza são variáveis planimétricas. Variáveis correlacionadas positivamente apresentam vetores com magnitudes semelhantes entre si (vetores estes que unem a origem e a posição das variáveis nos eixos x (PC I) e y (PC II)) e cosseno do ângulo formado entre seus vetores próximo ou igual a 1. Variáveis correlacionadas negativamente apresentam vetores com magnitudes semelhantes e cosseno do ângulo formado entre seus vetores próximo ou igual a -1.

Fonte: Produção do autor.

Dezesseis (16) variáveis geomorfométricas tiveram comportamento mais isolado e, portanto, não se enquadraram nos grupos descritos acima. Nesse estudo consideram-se variáveis com comportamento isolado aquelas que apresentaram  $r^2$  maior que 0,5 com somente uma ou nenhuma das demais variáveis (Tabela 5.1). Esse comportamento isolado pode ser devido à natureza da variável (em descrever algo não descrito por outras variáveis) ou devido à diferença entre a expressão da variável e o aspecto descrito devido à uma formulação inadequada para as condições de sua determinação. As distribuições espaciais (sob forma de mapas) das variáveis que apresentaram esse

comportamento isolado mostraram-se relativamente dissociados características topográficas da área de estudo.

Tabela 5.1 - Organização das variáveis de acordo com o número de coeficiente de determinação ( $r^2$ ) maior ou igual 0,5, sendo o  $r^2$  entre pares de variáveis que descrevem as 74 variáveis das microbacias selecionadas do Estado de São Paulo

Número de $r^2$ maior que 0,5	Variáveis
De 16 a 20	f10Sl, mH, mSlS, maxHd, maxSl, RI, Rug, Rug2, f7Sl, sdE, sdH, sdSl, f4Sl, mHd, mSl, mSl01, p90SlHd10
10 a 15	Cpc, MCS, fHd15, MSS, Texrt, C, O, A, BL, LMS, LS, LSP, nS, P, Hyp2, Slrt2, maxE
5 a 9	cvE, fHd10, mSlHd10
3 ou 4	CCM, DD, DSl, mLS, no1A, ER, Hyp, mdE, mE, Pd, SIMS, Dt, cvH
2	Elon, FF, Lmn, minE, Rlrt, rRl
1	Bo12, Bo23, RD, cE, Hyp1, Hyp3, OC
0	Amdo1, Amo1, LSo21, LSo32, mB, cSl, cvSl, mHd10, Slrt1

**Obs.:** As variáveis em cada linha estão ordenadas de forma crescente. Por exemplo, na primeira linha a variável f10Sl possui mais  $r^2$  maior que 0,5 que a variável p90SlHd10.

Fonte: Produção do autor.

Foram selecionadas 12 variáveis geomorfométricas de microbacias para dar prosseguimento a este estudo (Tabela 5.2). Essa seleção foi realizada considerando os seguintes aspectos:

- Variáveis que explicam grande proporção da variação estatística do conjunto de dados. Essa análise foi realizada pela verificação do padrão geral de redundância dos dados;
- Variáveis que representam os diferentes aspectos da microbacia, incluindo relevo, forma e estrutura da hidrografia. Esses aspectos estão descritos no Capítulo 2 desse estudo;
- Variáveis que apresentam padrão de distribuição coerente com a área de estudo. Nesse sentido, as variáveis foram visualizadas sob a forma de mapas e aquelas que apresentam padrão ruidoso ou incoerente com as características de relevo da área de estudo não foram escolhidas.

Tabela 5.2 - Variáveis geomorfológicas selecionadas dentre as 74 variáveis analisadas

Abreviação	Variável	Unidade	Transf. <sup>a</sup>
DD	Densidade de drenagem	km <sup>-1</sup>	-
DSI	Densidade de segmentos de drenagem	km <sup>-2</sup>	sqrt
FF	Fator forma: razão entre área de bacia (A) e o quadrado do comprimento da bacia	-	log
fHd15	Proporção de área com <i>HAND</i> <sup>b</sup> menor que 15 m	%	log
Hyp	Integral hipsométrica	-	-
mHd	<i>HAND</i> médio	m	log
mLS	Comprimento médio dos segmentos de drenagem da bacia hidrográfica	m	log
mSI	Declividade média da bacia hidrográfica: declividade média de todos os pixels da bacia	Grau	log
mSIS	Declividade média dos segmentos de drenagem	Grau	log
mE	Elevação média da bacia hidrográfica	m	log
mH	Altura média de todos os pixels em relação ao exutório da bacia	m	log
Rug2	Índice de rugosidade da bacia hidrográfica com modificações: produto entre DD e mHd, com ambas as variáveis transformadas para uma mesma magnitude de variância	-	log

<sup>a</sup>Transformação aplicada às variáveis para diminuir a assimetria de suas distribuições e permitir uma distribuição normal dos dados.

<sup>b</sup>*HAND*: *Height Above the Nearest Drainage*

Fonte: Produção do autor.

Variáveis que apresentaram comportamento isolado (que estão descorrelacionadas) das demais variáveis não foram selecionadas por potencialmente serem ruidosas ou conterem erros em sua elaboração.

Variáveis do grupo formado por SIMS, rRI e Rlrt não foram selecionadas por, nesse estudo, não ter sido verificado padrão de distribuição espacial coerente com as características de relevo da área de estudo; trabalho mais detalhado é necessário para a verificação dessas três variáveis.

Mais de uma variável do mesmo agrupamento eventualmente foram selecionadas, por representarem diferentes características da microbacia ou por não serem altamente correlacionadas ( $r^2 < 0,90$ ).

### 5.2.3 Estatísticas das variáveis selecionadas

Dentre as 12 variáveis selecionadas as mais correlacionadas estão mSl e mHd ( $r^2=0,87$ ), mSlS e mHd ( $r^2=0,85$ ) mSl e Rug2 ( $r^2=0,79$ ). Em particular, os  $r^2$  altos entre mSl e mHd e entre mSl e Rug2 demonstram que a mSl, uma variável relativamente mais simples de gerar, explica grande parte da variação estatística da mHd e da Rug2, que demandam maior nível de processamento. Assim, as variáveis mais correlacionadas entre si descrevem aspectos da declividade (mSl, mSlS), altura (mH, mHd e fHd15) e rugosidade (Rug2). Embora a Hyp seja descritor relacionado com a altura da microbacia, os valores calculados apresentam uma relação fraca com estas variáveis. A variável mE, que é descritor de altitude (altura média em relação ao nível do mar), apresenta relação fraca ou insignificante com todas as variáveis. As variáveis DSl e mLS, que descrevem características da hidrografia, apresentaram relação forte entre si ( $r^2=0,73$ ), mas fraca ou insignificante com todas as outras variáveis. A variável DD não apresentou uma boa correlação com as demais variáveis, exceto com a Rug2 ( $r^2=0,72$ ) que é gerada com base no produto da própria DD e a mHd. A variável que descreve forma (FF) não apresentou relação com as demais variáveis (Tabela 5.3).

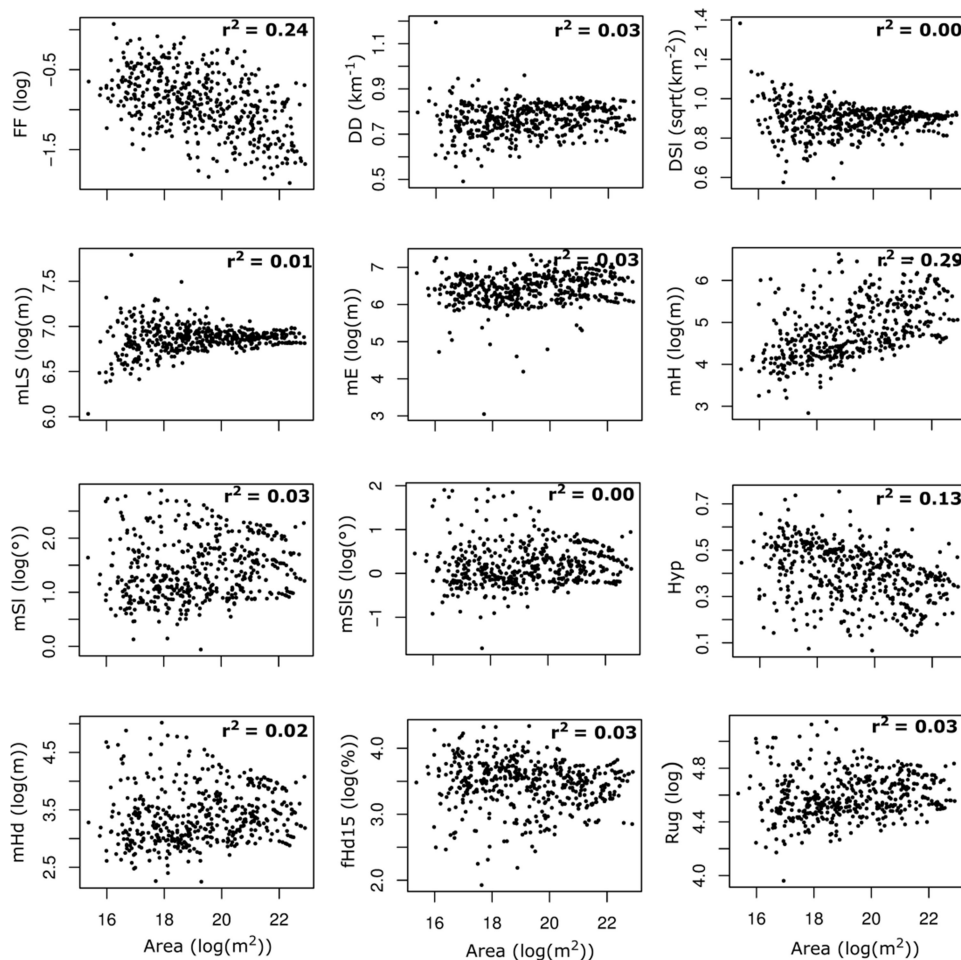
Tabela 5.3 - Matriz de coeficientes de determinação ( $r^2$ ) das variáveis selecionadas obtida com as microbacias selecionadas do Estado de São Paulo

Variáveis	FF	DD	DSl	mLS	mE	mH	mSl	mSlS	Hyp	mHd	fHd15	Rug2
FF	<b>1,00</b>											
DD	0,04	<b>1,00</b>										
DSl	0,00	0,19	<b>1,00</b>									
mLS	0,00	0,01	0,73	<b>1,00</b>								
mE	0,01	0,05	0,01	0,00	<b>1,00</b>							
mH	0,10	0,15	0,00	0,02	0,25	<b>1,00</b>						
mSl	0,01	0,34	0,09	0,00	0,18	0,58	<b>1,00</b>					
mSlS	0,00	0,13	0,04	0,00	0,15	0,61	0,73	<b>1,00</b>				
Hyp	0,03	0,15	0,01	0,01	0,00	0,02	0,16	0,01	<b>1,00</b>			
mHd	0,00	0,17	0,04	0,00	0,18	0,63	0,87	0,85	0,10	<b>1,00</b>		
fHd15	0,00	0,11	0,04	0,00	0,20	0,49	0,75	0,66	0,03	0,75	<b>1,00</b>	
Rug2	0,02	0,72	0,15	0,00	0,11	0,45	0,79	0,56	0,16	0,66	0,45	<b>1,00</b>

Fonte: Produção do autor.

A relação de dependência quanto à escala (Figura 5.12) é fraca ou inexistente para as variáveis selecionadas; sendo este um dos motivos desta seleção. As variáveis que demonstraram as maiores dependência quanto à escala foram mH ( $r^2=0,29$ ), FF ( $r^2=0,24$ ) e Hyp ( $r^2=0,13$ ). Em relação à mH, era de se esperar dependência da escala, pois microbacias maiores tendem a possuir mH mais elevados que microbacias menores (EVAN, 1972). Para as variáveis FF e Hyp, essa dependência era inesperada, mas de qualquer forma, ela é considerada fraca considerando os  $r^2$  calculados. Uma vez que o valor da variável mH varia com a escala, a relação de dependência pode comprometer determinadas aplicações que englobam múltiplas escalas (SHARY; SHARAYA; MITUSOV, 2002). Nesse caso, o mHd apresenta-se como uma alternativa de interesse para substituir o mH, por apresentar independência em relação a escala (Figura 5.12).

Figura 5.12 - Diagrama de dispersão e coeficiente de determinação entre variáveis geomorfométrica de microbacias hidrográficas e área das microbacias para as microbacias selecionadas do Estado de São Paulo

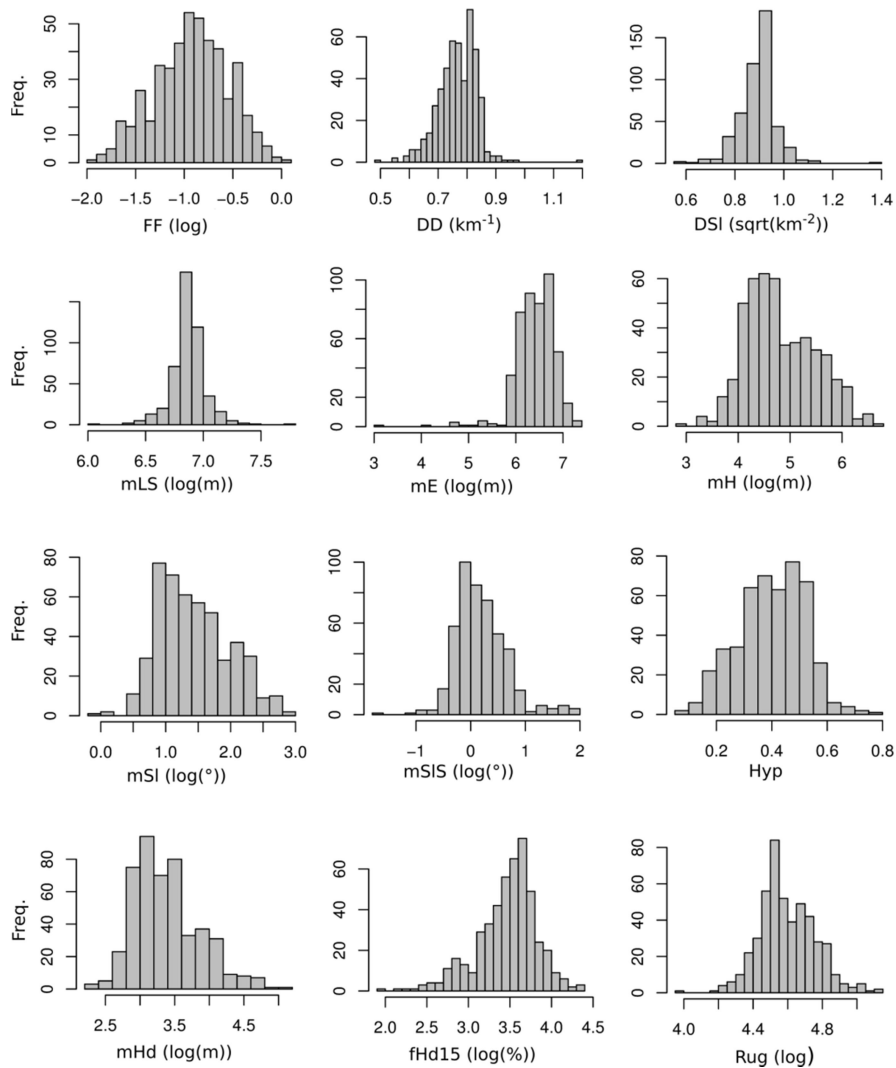


Fonte: Produção do autor.



Os histogramas das variáveis indicam, no geral, distribuição unimodal e simétrica para as variáveis (Figura 5.13). A maioria das variáveis foram transformadas para aumentar a simetria de sua distribuição de probabilidade. As transformações não resultaram em melhorias para as variáveis DD e Hyp e, por isso, elas não foram transformadas. Principalmente para as variáveis mE, mH e mSl, mesmo com transformação, a análise visual dos histogramas revela certa assimetria em suas distribuição. Apesar dessa constatação, o teste de Shapiro-Wilk indicou que a distribuição de probabilidade dessas variáveis pode ser aproximada à distribuição normal (p-valor<0,05).

Figura 5.13 - Histograma das variáveis geomorfológicas das microbacias selecionadas do Estado de São Paulo, após as respectivas transformações



Fonte: Produção do autor.

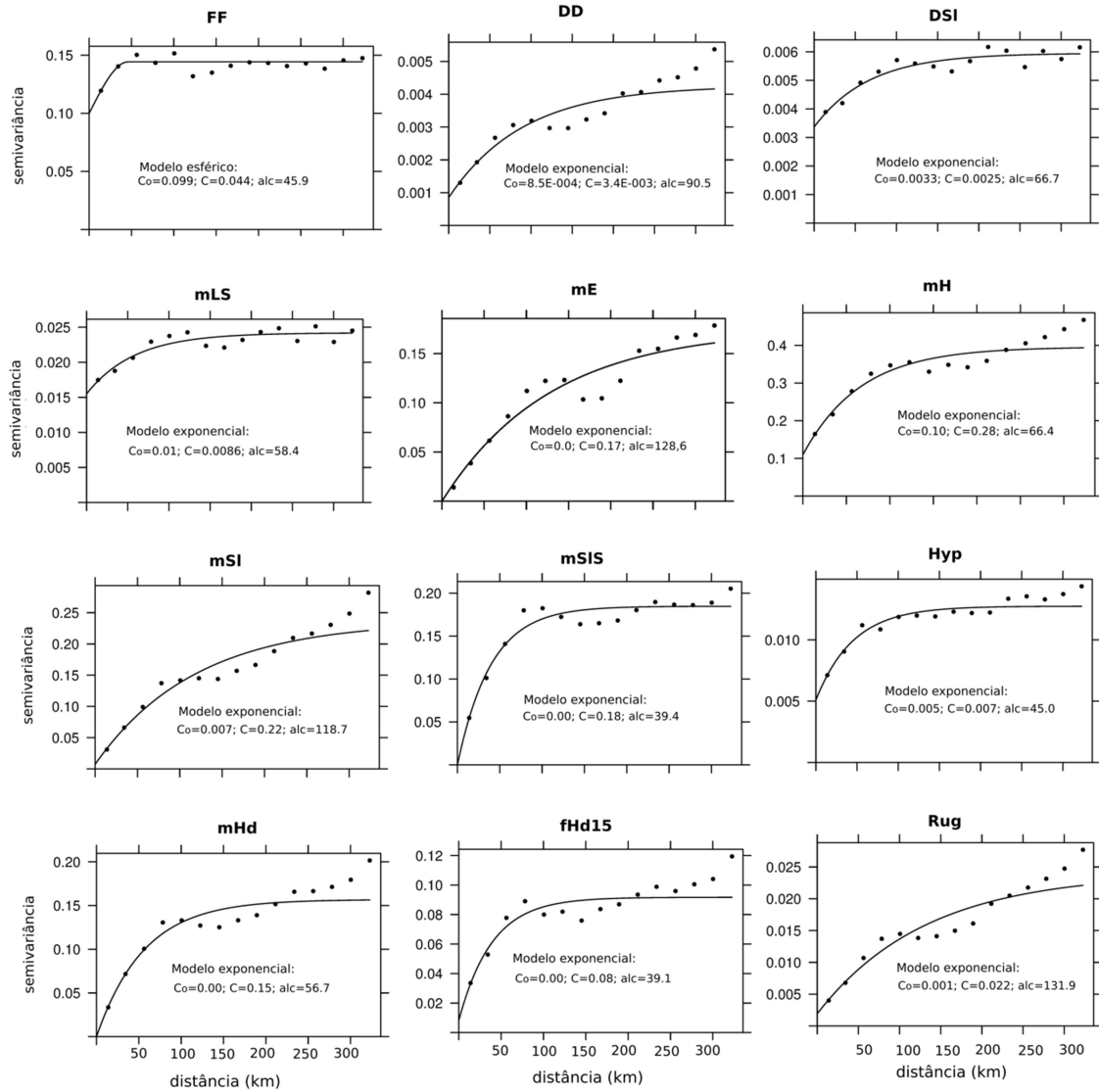
### **5.3 Regionalização das variáveis geomorfométricas**

#### **5.3.1 Análise geoestatística e interpolação**

Os variogramas experimentais das variáveis geomorfométricas apresentaram transição gradual até o alcance, sendo o modelo exponencial o que apresentou o melhor ajuste para a maioria das variáveis (Figura 5.14). Para a variável FF há pronunciado efeito pepita, relativamente alto em relação ao patamar, numa indicação que esta variável apresenta variação espacial abrupta ou autocorrelação espacial fraca. Por outro lado, as demais variáveis mostraram autocorrelação espacial forte, com maiores diferenças entre efeito pepita e patamar e, geralmente, maiores alcances. Isso indica que estas variáveis apresentam distribuição passível de regionalização uma vez que a dependência espacial é uma condição que permite a interpolação e a compartimentação regional.

Com base nos semivariogramas gerados foram realizadas as interpolações das variáveis por krigagem (Figura 5.15). Verifica-se que as variações espaciais da variável FF são mais abruptas que as demais variáveis, conforme pode ser previsto a partir do alto valor de pepita observado na análise dos semivariogramas. A análise visual das variáveis interpoladas permite uma percepção de suas variações espaciais, revelando grandes compartimentos geomorfométricos, o que seria mais dificilmente percebido por meio da análise da distribuição espacial de pontos (centroide ou exutório das bacias) ou polígonos (divisores de água) das microbacias.

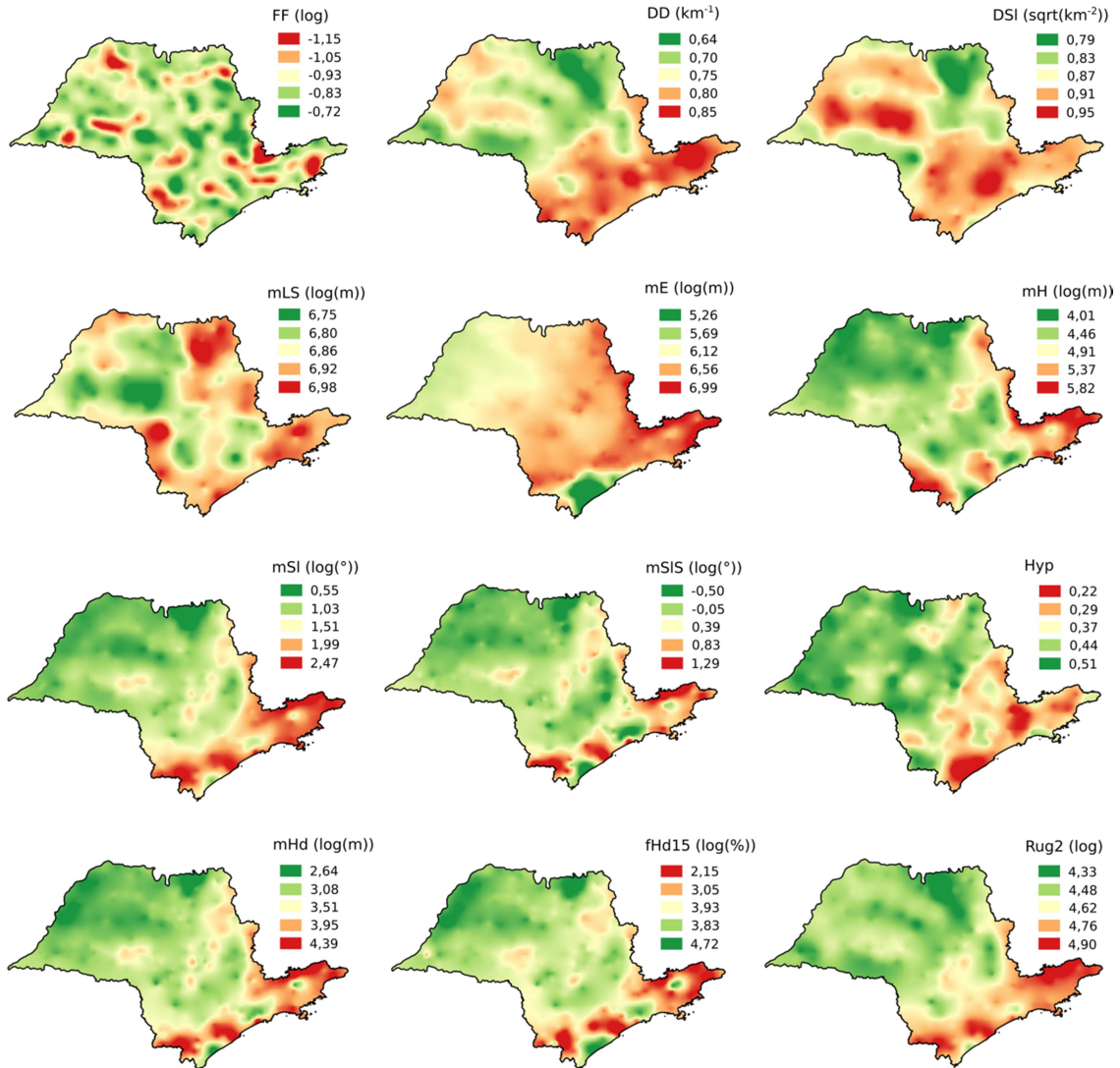
Figura 5.14 - Semivariogramas e seus coeficientes para as diferentes variáveis geomorfométricas de bacias hidrográficas



$C_0$  é o efeito pepita,  $C$  é o patamar parcial (diferença entre patamar e  $C_0$ ) e  $alc$  é o alcance.

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.15- Distribuição das variáveis geomorfométricas de microbacias interpoladas por krigagem



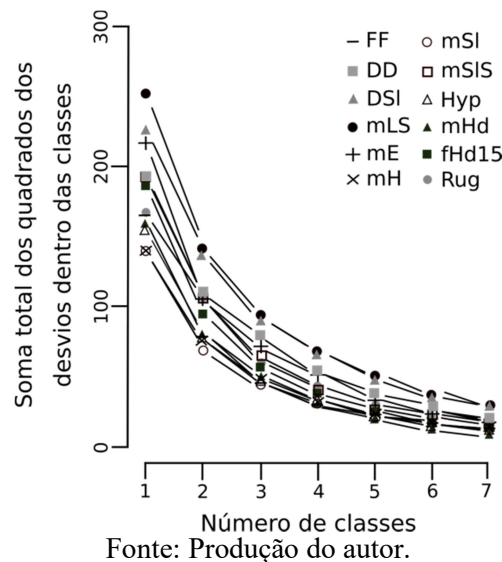
Fonte: Produção do autor.

### 5.3.2 Classificação das variáveis geomorfométricas

A definição do número de classes na classificação das variáveis geomorfométricas foi realizada com base na análise da soma total dos quadrados dos desvios dentro das classes (STQD) e nas características da área de estudo. Em geral, uma classificação com baixo STQD apresenta classes coesas, ou baixa variância dentro das classes (EVERITT; HOTHORN, 2011). Nota-se que a partir de 3 classes (ou 3 grupos) o STQD não diminui tanto quanto de 2 para 3 ou 1 para 2 classes, para todas as variáveis geomorfométricas

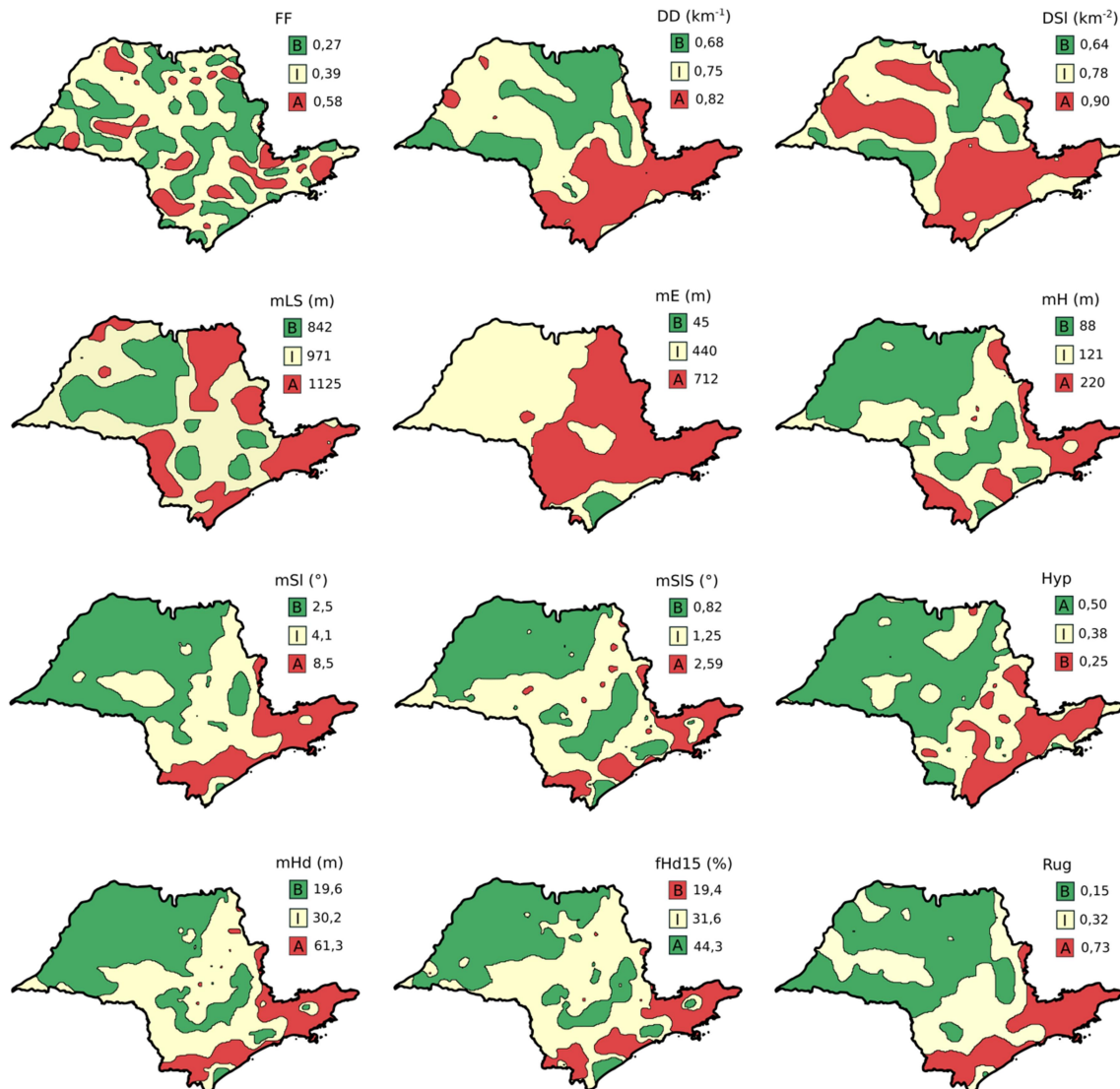
(Figura 5.16). Isso indica que a coesão das classes não melhora tanto a partir de 3 classes. Corroborando com esta análise, a área de estudo pode ser dividida em três grandes ambientes de acordo com as características gerais do relevo: (1) a região do cristalino de relevo montanhoso (Planalto Atlântico e Províncias Costeiras); (2) a região sedimentar de relevo plano a suave ondulado (Planalto Ocidental); e (3) região de transição ou intermediária (Depressão Periférica e Cuestas Basálticas). Portanto, a classificação das variáveis em três classes mostra-se razoável de acordo com as características estatísticas dos dados e também da área de estudo.

Figura 5.16 - Soma total dos quadrados dos desvios dentro das classes em relação ao número de classes para as 12 variáveis geomorfológicas selecionadas do Estado de São Paulo



Cada variável geomorfológica foi classificada em três classes de valores altos, intermediários e baixos, de acordo com os valores médios de cada classe (Figura 5.17). Em geral, as classes são formadas por grandes regiões em quantidade de 3 a 5, exceto para a variável FF. A variável FF foi a que resultou em uma classificação mais fragmentada. Isso indica que sua variação é mais abrupta. Ao considerar que estas variáveis geomorfológicas foram pouco estudadas no âmbito da caracterização regional do relevo, sua aplicação pode resultar em ganhos para mapeamentos diversos, principalmente por seu caráter mensurável ou quantitativo dos compartimentos do relevo. Essa compartimentação é de difícil percepção por análise visual ou qualitativa.

Figura 5.17 - Distribuição das classes de cada variável geomorfométrica no Estado de São Paulo



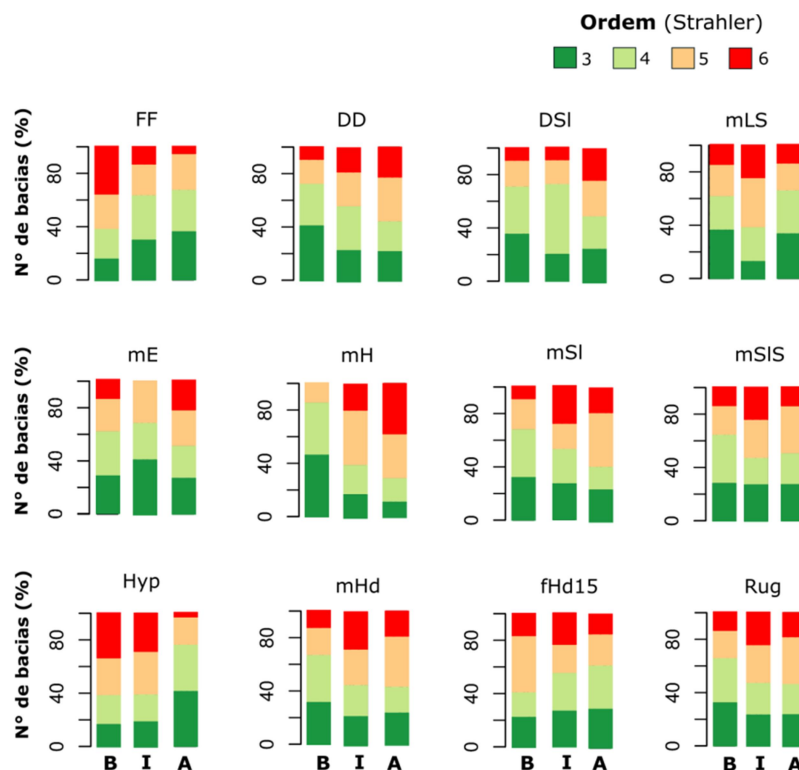
B é a classe de valores baixos da variável, I de valores intermediários e A de valores altos. Os valores da legenda são as médias de cada uma das três classes para as respectivas variáveis.

Fonte: Produção do autor.

A proporção das ordens das 477 microbacias em cada classe indica que, em geral, são representadas pelas diferentes ordens em proporções similares (Figura 5.18). No entanto, isso não é tão evidente para as variáveis FF, mE, mH e Hyp. Para as variáveis mE e mH as microbacias de sexta ordem não estão presentes na classe I e B, respectivamente. Para as variáveis FF, mH e Hyp observa-se que há tendência de aumento ou diminuição na frequência das microbacias de ordens menores da classe B para a A. Isso ocorre de maneira mais pronunciada para a variável mH, de tal maneira que microbacias de sexta ordem não ocorre na classe B. Esse comportamento dessas

variáveis corroboraram com os resultados da Figura 5.12, indicando que elas apresentam dependência em relação à escala. Em relação à variável mE, a baixa frequência (ou ausência) de microbacias de sexta ordem na classe I é explicado pela pequena área ocupada por esta classe na área de estudo (Figura 5.17).

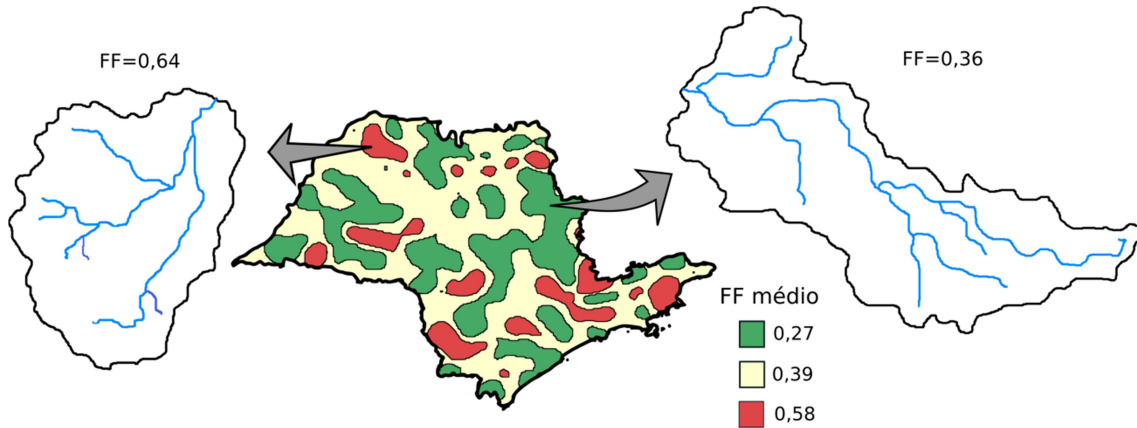
Figura 5.18 - Proporção das ordens das microbacias em cada classe das variáveis geomorfométricas para o Estado de São Paulo



B é a classe de valores baixos da variável, I de valores intermediários e A de valores altos.  
 Fonte: Produção do autor.

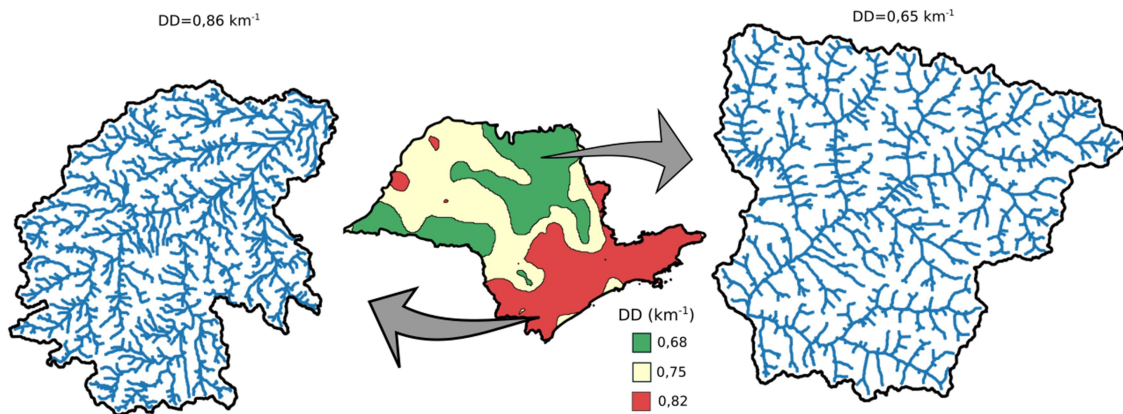
Microbacias da área de estudo foram selecionadas para ilustrar as diferenças entre as classes de cada variável geomorfométrica (Figura 5.19 a 5.22). Nota-se que microbacias de classes diferentes apresentam características que se contrastam em termos de forma, estrutura da drenagem e relevo. Por exemplo, a comparação da microbacia com integral hipsométrica (Hyp) baixa com a de de integral hipsométrica alta indica que na primeira há predomínio de terrenos baixos (baixo predominante - cor verde), enquanto que na segunda há predomínio de terrenos altos (alto predominante - cor vermelha) (Figura 5.22).

Figura 5.19 - Microbacias hidrográficas seleccionadas para representar as classes da variável geomorfométrica fator forma (FF) no Estado de São Paulo



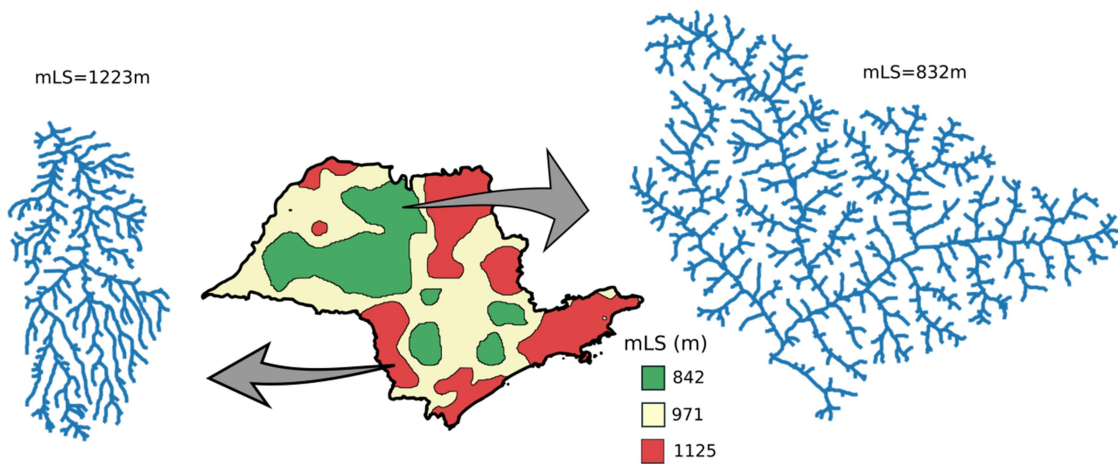
Fonte: Produção do autor.

Figura 5.20 - Microbacias seleccionadas para representar a classe da variável geomorfométrica densidade de drenagem (DD) no Estado de São Paulo



Fonte: Produção do autor.

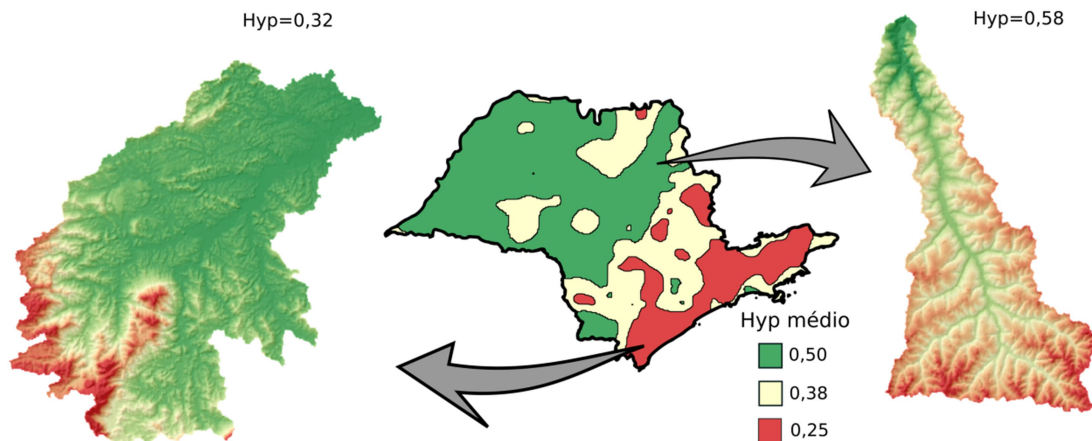
Figura 5.21 - Microbacias seleccionadas para representar as classes da variável geomorfométrica comprimento médio dos canais (mLS) no Estado de São Paulo



Fonte: Produção do autor.



Figura 5.22 - Microbacias selecionadas para representar as classes da variável geomorfométrica integral hipsométrica (Hyp) no Estado de São Paulo



Fonte: Produção do autor.

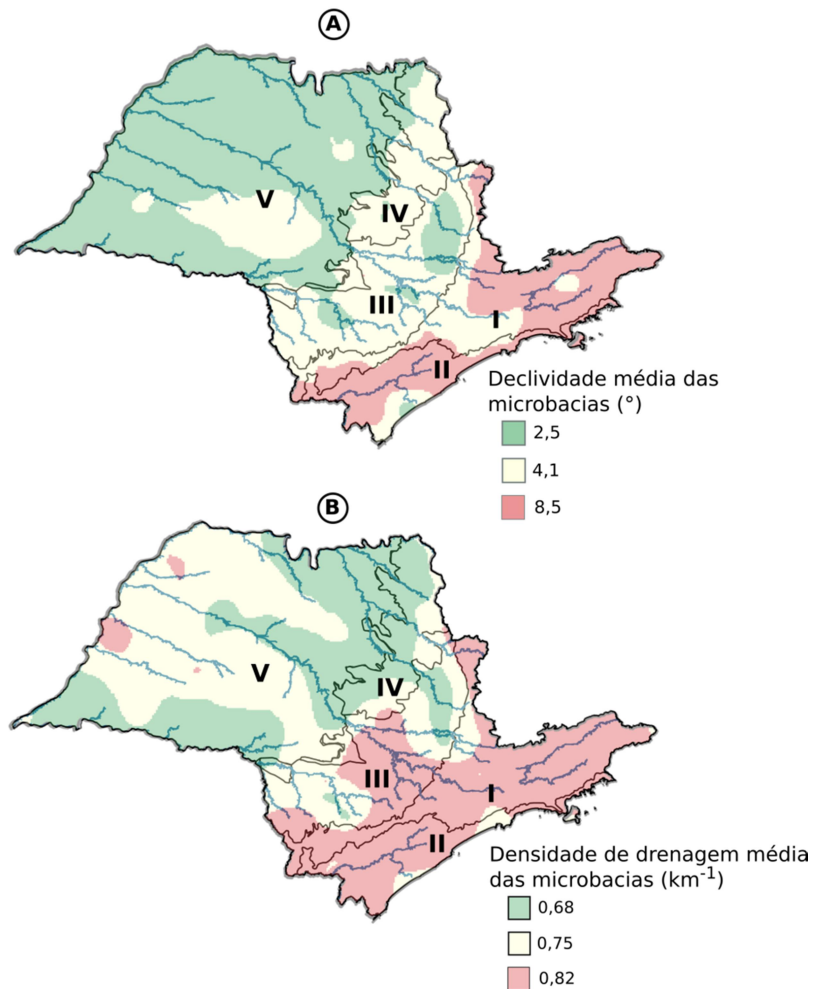
#### 5.4 Caracterização das províncias geomorfológicas e das classes de solos

Pela análise visual, a distribuição espacial de algumas classes das variáveis geomorfométricas possuem semelhanças com ao mapa de solos e com as províncias geomorfológicas. Por exemplo, as três classes da variável mSl tem limites semelhantes aos das principais províncias geomorfológicas (Figura 5.23 - A). A classe B da mSl é localizada predominantemente no Planalto Ocidental, a classe I na Depressão Periférica e nas Cuestas Basálticas e a classe A no Planalto Atlântico e nas Províncias Costeiras.

A classe A da variável DD é predominantemente localizada no Planalto Atlântico e nas Províncias Costeiras, que são regiões de litologia mais resistente pertencentes ao cristalino, sendo esperado a mais alta DD da área de estudo por causa de relativa baixa capacidade de infiltração e armazenamento de água no solo (GREGORY; WALLING, 1968). As classes B e I da DD são localizadas principalmente nos basaltos e arenitos, que são terrenos mais permeáveis que os do cristalino (Figura 5.23-B).

O Planalto Ocidental e as Cuestas Basálticas são as províncias geomorfológicas com microbacias com menor declividade média (mSl e mSIS), altura média (mH) e índice de rugosidade (Rug2) (Figura 5.24). Além disso, possuem microbacias com integral hipsométrica (Hyp) relativamente mais alta, o que indica um estágio de trabalho da erosão fluvial menos evoluído que nas demais províncias (SINGH; SARANGI; SHARMA, 2008; STRAHLER, 1964).

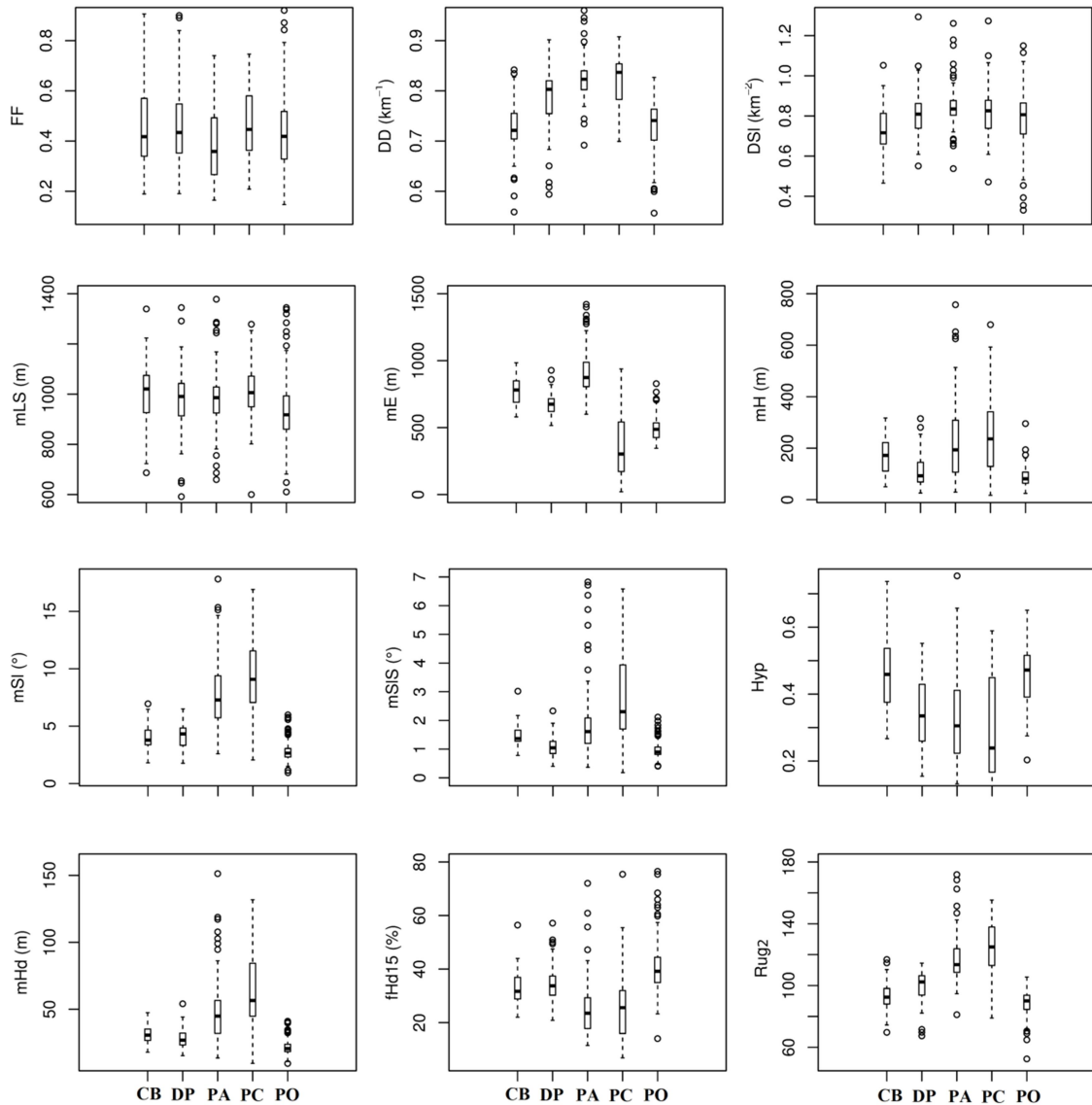
Figura 5.23 - Províncias geomorfológicas (I, II, III, IV e V), declividade média das microbacias (A) e densidade de drenagem das microbacias (B) do Estado de São Paulo para comparação visual



Onde, I: Planalto Atlântico; II: Províncias Costeiras; III: Depressão Periférica; IV: Cuestas Basálticas; e V: Planalto Ocidental (IPT, 1981).

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.24 - Boxplot das diferentes províncias geomorfológicas em relação às variáveis geomorfométricas das microbacias do Estado de São Paulo



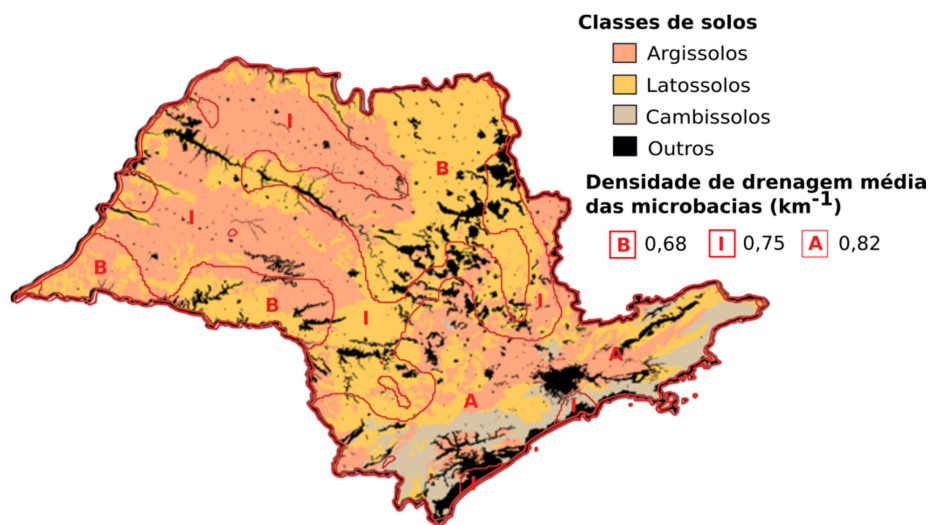
Onde, CB: Cuestas Basálticas; DP: Depressão Periférica; PA: Planalto Atlântico; PC: Províncias Costeiras; e PO: Planalto Ocidental (IPT, 1981).

Fonte: Produção do autor.

A classe de densidade de drenagem baixa (B) é localizada predominantemente nos Latossolos Vermelhos e a classe intermediária (I) nos Argissolos (Figura 5.25). Isso indica que a variável DD é boa indicadora para separar diferentes tipos de terrenos ao se considerar que os Latossolos são solos com maiores profundidades e permeabilidade que os Argissolos (EMBRAPA, 2013; RESENDE et al., 2014). Em contraposição, Argissolos possuem menor capacidade de infiltração de água favorecendo a formação de densidade de drenagem mais elevada do que sobre os Latossolos.

Os Argissolos tiveram uma mLS menos elevada que os Latossolos e Cambissolos. Os Latossolos e os Argissolos do Planalto Ocidental e das Cuestas Basálticas são os solos menos declivosos (mSl e mSlS) e com menor amplitude de variação da elevação (mH). Os Cambissolos são os predominantemente localizados nas regiões mais íngremes (mSl e mSlS) e com maior índice de rugosidade (Rug2). A menor densidade de drenagem (DD) e densidade de segmentos de drenagem (DSI) são encontradas nos Latossolos do Planalto Ocidental e das Cuestas Basálticas, que são predominantemente Latossolo Vermelho. O fator forma das microbacias (FF) não se mostrou útil para diferenciar ou discriminar as classes de solos uma vez que todas as classes de solos apresentaram FF semelhantes entre si. As variáveis DD, mLS, mSl e Rug estão entre as variáveis que mais diferenciaram as classes de solos (Figura 5.26).

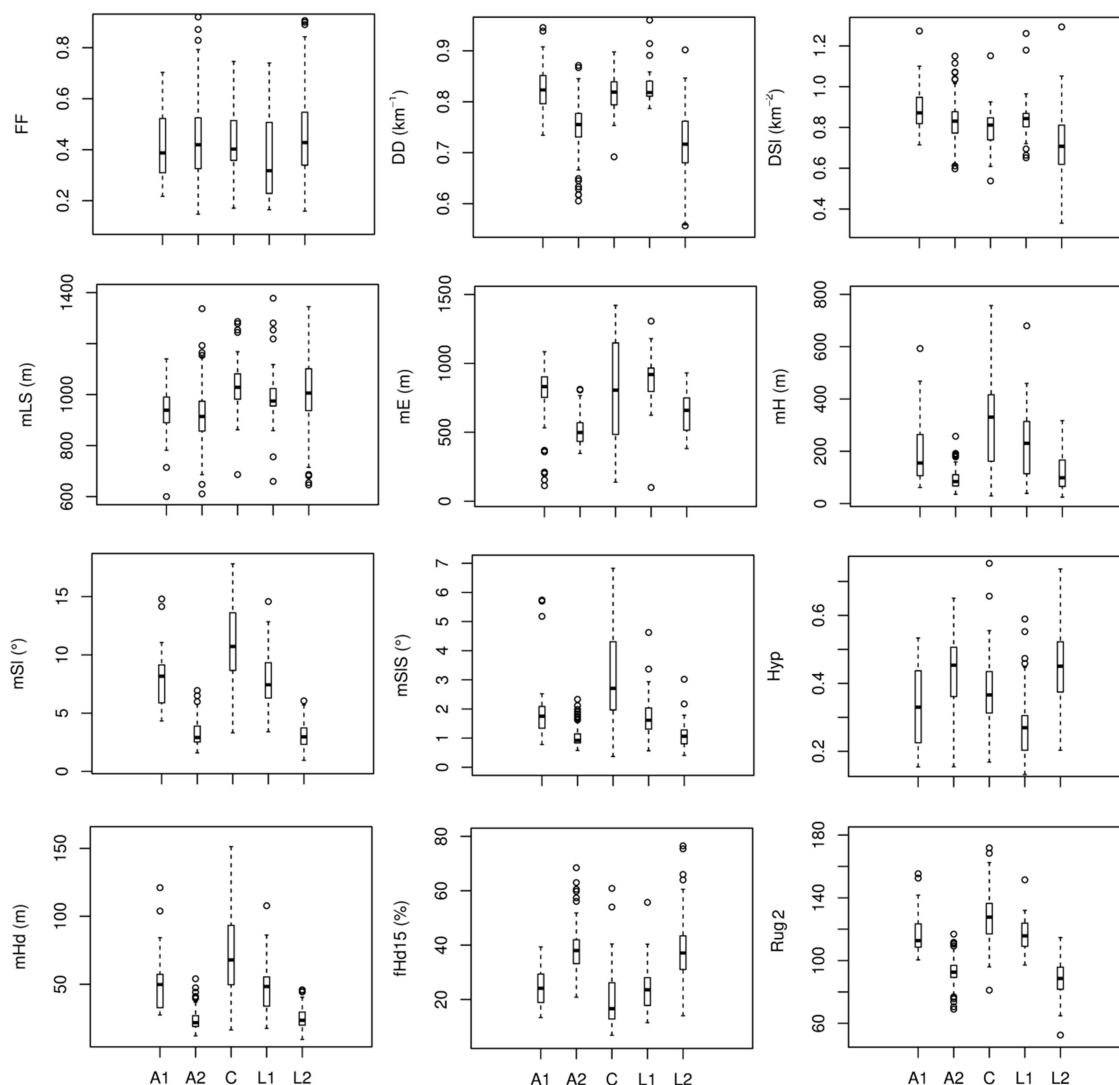
Figura 5.25 – Classes de solos (Oliveira, 1999) e densidade de drenagem das microbacias do Estado de São Paulo para comparação visual



Onde, B é a classe de valores baixos, I de valores intermediários e A valores altos da densidade de drenagem, conforme indicado pelos valores médios.

Fonte: Produção do autor.

Figura 5.26 - Boxplot das diferentes classes de solos em relação às variáveis geomorfométricas das microbacias do Estado de São Paulo



A: Argissolos; C: Cambissolos; e L: Latossolos. Os Latossolos e os Argissolos foram divididos em dois grupos: 1 - localizados no Planalto Atlântico e nas Províncias Costeiras; 2 - localizados na Depressão Periférica, nas Cuestas Basálticas e no Planalto Ocidental.

Fonte: Produção do autor.

## 5.5 Considerações gerais

A elaboração dos planos de informação elevação (MDE), declividade, *HAND* (altura em relação à drenagem mais próxima) e hidrografia classificada pelo método de Strahler (1964) constituíram os primeiros resultados desse estudo. A partir desses planos de informação, delimitou-se um conjunto de 477 microbacias para toda a área de estudo e elaborou-se 74 variáveis geomorfométricas para cada microbacia. A análise desse

conjunto de variáveis culminou em uma seleção de 12 variáveis que explicam grande parte da variação estatística do conjunto de dados e representam os diversos aspectos geomorfométricos das microbacias, incluindo forma, relevo e hidrografia. As características gerais dessas variáveis geomorfométricas selecionadas encontram-se na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Características gerais das 12 variáveis geomorfométricas selecionadas neste estudo para caracterização de microbacias do Estado de São Paulo

Abreviação	Variável	Características gerais
DD	Densidade de drenagem	Expressão da distância entre os canais. Útil para inferir sobre as características do substrato (rochas e solos), como sua resistência e permeabilidade
DSI	Densidade de segmentos de drenagem	Mostrou-se como dos indicadores da distância entre interflúvios
FF	Fator forma	Descritor do formato da bacia. Não apresentou dependência espacial e, portanto, capacidade para formar regiões homogêneas
fHd15	Proporção de área com <i>HAND</i> <sup>a</sup> menor que 15 m	Indicador da proporção de planícies de inundação da bacia hidrográfica
Hyp	Integral hipsométrica	Descritor da profundidade de dissecação da bacia hidrográfica ou do nível de trabalho da erosão fluvial na superfície
mHd	<i>HAND</i> médio	Altura média em relação a drenagem mais próxima de toda a bacia. Possui correlação alta com a declividade média da bacia
mLS	Comprimento médio dos segmentos de drenagem da bacia hidrográfica	Distância média entre duas bifurcações dos segmentos de drenagem. Mostrou-se útil para separar Argissolos de Latossolos
mSI	Declividade média da bacia hidrográfica	Inclinação média de toda a superfície da bacia. Um dos indicadores da velocidade de escoamento superficial e da quantidade de água que se infiltra no solo
mSIS	Declividade média dos segmentos de drenagem	Indicador da velocidade média da água nos canais de drenagem
mE	Elevação média da microbacia hidrográfica	Elevação média da microbacia em relação ao nível do mar. Indicador do contexto climático da microbacia
mH	Altura média da bacia em relação ao exutório	Descritor do relevo ou amplitude altimétrica da bacia
Rug2	Índice de rugosidade da bacia hidrográfica	Mostrou-se importante para separar Cambissolos das demais classes de solos

<sup>a</sup>*HAND*: *Height Above the Nearest Drainage*

Fonte: Produção do autor.

O tratamento das variáveis geomorfométricas por meio da aplicação de funções matemáticas simples reduziu a assimetria de suas distribuições de probabilidade e conseqüentemente favoreceu aplicação de métodos paramétricos em sua análise.

Para análise da distribuição regional de variáveis geomorfométricas de microbacias o semivariograma e a interpolação mostraram-se úteis. Os semivariogramas representaram a dependência espacial de cada variável e, portanto, suas capacidades na

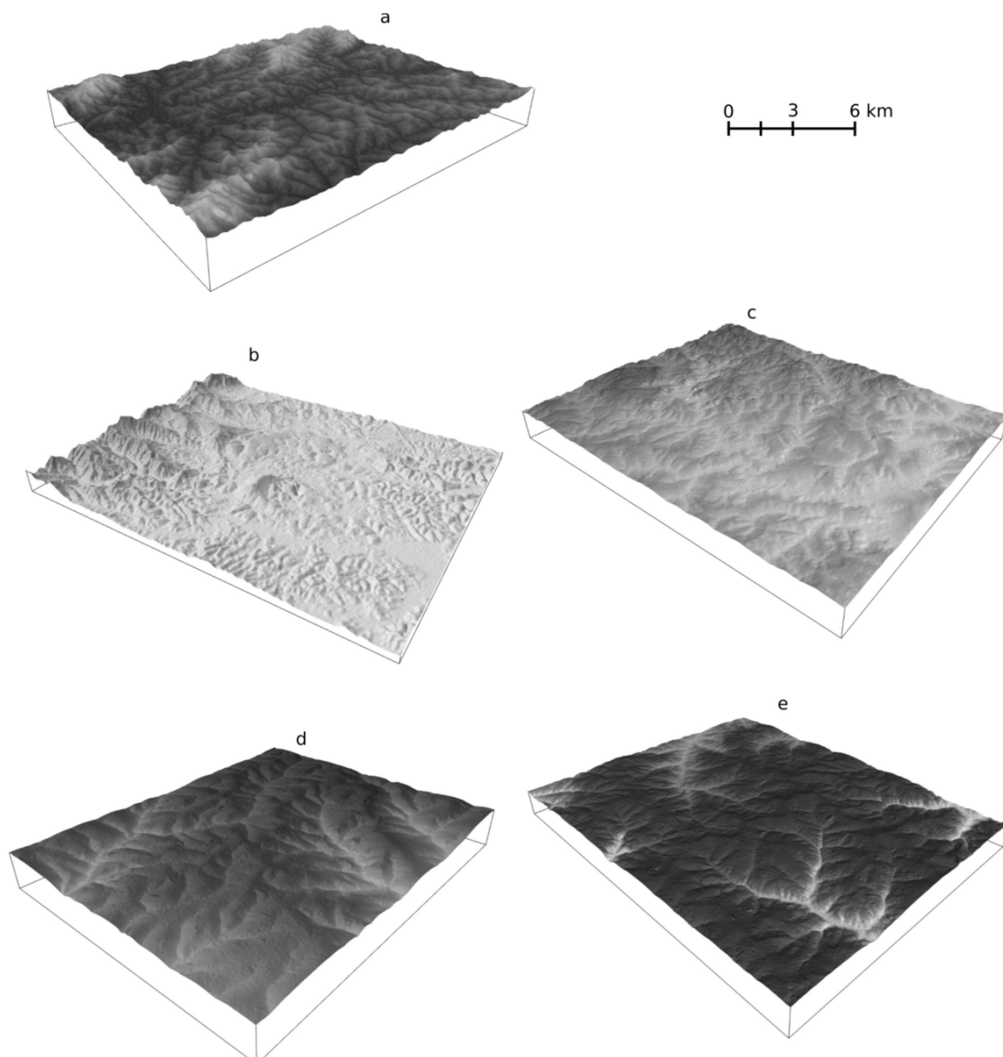
formação de regiões contíguas no espaço. A interpolação permitiu a representação e análise das variáveis em formato *raster*, para melhor visualização e integração com outros planos de informação, bem como análise, se comparada às representações no formato de polígonos (divisores de águas) ou a pontos (exutório ou centroide) espacialmente descontínuos no espaço: os dados produzidos não fornecem cobertura completa da área de estudo.

Os resultados da análise regional das variáveis geomorfométricas de microbacias demonstraram que é possível definir regiões homogêneas a partir delas - como a partir da integral hipsométrica e da densidade de drenagem. Essas regiões apresentam certa relação com os mapas geomorfológicos e pedológicos da área de estudo. Nesse aspecto, a microbacia representa uma unidade importante para caracterização quantitativa do relevo e para distinção quantitativa de diferentes tipos de ambientes (Figura 5.27) em escalas gerais.

Esse estudo abordou dados geomorfométricos em três níveis hierárquicos: (1) variáveis geomorfométricas primárias, que variam de *pixel* a *pixel*, como elevação, declividade e *HAND*; (2) variáveis geomorfométricas de microbacias, que descreveram microbacias de ordens 3 a 6, com tamanhos que variaram de 4,7 a 8806,8 km<sup>2</sup>; e (3) classes variáveis geomorfométricas de microbacias (por exemplo, microbacias com declividade alta). Esses três níveis variam de microrelevo a macrorelevo (RASEMANN et al., 2004).

Uma das prioridades na escolha de microbacias para a regionalização é a definição da escala. Estudos de comparações em diferentes escalas são pertinentes. Quando se utilizam microbacias de diferentes ordens ou tamanhos deve-se ter atenção com o viés das variáveis que são dependentes de escala, ou seja, variáveis que variam em função do tamanho das microbacias. Nesse caso, o ideal é o uso de variáveis que são independentes da escala. Apontou-se as variáveis que mostraram dependência em relação à escala, que foram 14 com alta dependência (LS, nS, P, C, LPS, LMS, BL, Hyp2, MSS, Texrt, O, Slrt2, Cpc e MCS) e outras com média a baixa dependência, incluindo a FF, a mH e a Hyp.

Figura 5.27 – Blocos diagramas elaborados a partir do MDE para representar os diferentes relevos nas cinco províncias geomorfológicas do Estado de São Paulo



Onde, a: Planalto Atlântico; b: Províncias Costeiras; c: Depressão Periférica; d: Cuestas Basálticas; e: Planalto Ocidental (IPT, 1981).

Fonte: Produção do autor.

Esforços adicionais são necessários para definir regiões com limites mais detalhados e precisos. Uma das alternativas para solução parcial desse problema é a análise de um conjunto maior de microbacias de tamanhos menores, lembrando que as regiões resultantes mantêm-se controlados pelos divisores de água. Para mapeamentos em escalas de 1:500.000 ou mais detalhados o ideal é o uso de outras unidades de mapeamentos, como segmentos definidos a partir de variáveis geomorfométricas locais (ANDERS et al., 2011; VALERIANO; ROSSETTI, 2017).

Para estudos futuros seguem algumas sugestões e recomendações:



(1) A rede hidrográfica digital (RHD) gerada nesse estudo, apesar de ter sido considerada satisfatória, deve ser mais bem avaliada e, se necessário, editada. Alternativamente, devem ser testadas outras metodologias para geração da RHD, por exemplo, com a utilização de múltiplos limiares que variam de acordo com as características do relevo (BANON, 2013; HEINE; LANT; SENGUPTA, 2004);

(2) Comparar outras unidades de mapeamentos (por exemplo, o segmento) com a microbacia, de preferência em diferentes escalas e utilizado variáveis como a integral hipsométrica e a densidade de drenagem;

(3) Calcular as variáveis geomorfométricas de microbacias (por exemplo, fator forma, declividade média e densidade de drenagem) para todos os possíveis exutórios (pixels) de microbacias no MDE e analisar seus padrões de distribuição. No presente estudo foi realizado esse cálculo somente para algumas microbacias selecionadas;

(4) Relacionar as variáveis em (3) com outros dados, como os hidrológicos (vazão média, vazão máxima, etc.).



## 6 CONCLUSÕES

O modelo digital de elevação e ferramentas de geoprocessamento permitiram implementar o cálculo automatizado de variáveis geomorfométricas de 477 microbacias de maneira eficiente. A programação desse cálculo está disponível no Apêndice A.

A delimitação de regiões homogêneas e sua posterior caracterização quantitativa a partir de variáveis geomorfométricas de microbacias hidrográficas permitiu a definição de compartimentos gerais do relevo.

As variáveis geomorfométricas de microbacias hidrográficas apresentaram padrão geral de distribuição coerente com as províncias geomorfológicas e com as classes de solos, quando são comparados seu tamanho, localização, e características geomorfométricas com os mapas de referência e os respectivos dados descritivos.

A variabilidade espacial de curto alcance e a dependência em relação à escala são características de algumas variáveis geomorfométricas de microbacias que podem impor restrições à sua regionalização. No primeiro caso, a independência espacial resulta em baixa contiguidade das classes mapeadas, com pouca agregação das microbacias adjacentes. A dependência de escala, por sua vez, modifica o valor das variáveis em função do tamanho das microbacias, o que dificulta integrações e análises multiescalas.

Algumas variáveis de microbacias hidrográficas, tais como densidade de drenagem, integral hipsométrica, índice de rugosidade e comprimento médio dos canais mostraram-se as variáveis mais correlacionadas à distribuição geral do relevo e de solos em escalas regionais dos mapeamentos de referência.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRAHAMS, A. D.; PONCZYNSKI, J. J. Drainage density in relation to precipitation intensity in the U.S.A. **Journal of Hydrology**, v. 75, n. 1–4, p. 383–388, dez. 1984.
- ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim do Instituto Geográfico e Geológico**, v. 41, n. 3, p. 169–263, 1964.
- 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, n. 12, p. 2976–2985, dez. 2011.
- ANDRADES FILHO, C. O.; ROSSETTI, D. F.; ZANI, H. Hipsometria derivada de MDE-SRTM aplicada na distinção entre a Formação Barreiras e os Sedimentos Pós-Barreiras na Bacia Paraíba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 15., Curitiba, PR. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2011
- ARNETT, R. R.; CONACHER, A. J. Drainage basin expansion and the nine unit landsurface model. **Australian Geographer**, v. 12, n. 3, p. 237–249, 1973.
- ARRUDA, G. P.; DEMATTÊ, J. A. M.; CHAGAS, C. S. Mapeamento digital de solos por redes neurais artificiais com base na relação solo-paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, n. 2, p. 327–338, abr. 2013.
- AYADI, I. et al. Sediment yield variability in central Tunisia: a quantitative analysis of its controlling factors. **Hydrological Sciences Journal**, v. 55, n. 3, p. 446–458, 23 abr. 2010.
- AZOR, A.; KELLER, E. A.; YEATS, R. S. Geomorphic indicators of active fold growth: South Mountain–Oak Ridge anticline, Ventura basin, southern California. **Geological Society of America Bulletin**, v. 114, n. 6, p. 745–753, jun. 2002.
- BAND, L. E. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 22, n. 1, p. 15–24, jan. 1986.
- BAND, L. E. et al. Modelling watersheds as spatial object hierarchies: structure and dynamics. **Transactions in GIS**, n. 4, p. 181–196, 2000.
- BANON, L. C. **Árvores de decisão aplicadas à extração automática de redes de drenagem**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2013.
- 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, jan. 2004.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology / Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43–69, mar. 1979.

- BIVAND, B. et al. **Package ‘maptools’**. 2017a. Disponível em: <<http://r-forge.r-project.org/projects/maptools>>. Acesso em: out. 2017.
- BIVAND, B. et al. **Package ‘rgdal’**. 2017b. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/rgdal/rgdal.pdf>>. Acesso em: out. 2017.
- BIVAND, R. **spgrass6**: interface between GRASS 6 and R. Disponível em: <<http://CRAN.R-project.org/package=spgrass6>>. Acesso em: 11 abr. 2016.
- BÖHNER, J.; ANTONIC, O. Geomorphometry: a brief guide. In: HENGL, T.; REUTER, H. (Eds.). **Land-surface parameter specific to topo-climatology**. Amsterdam: Elsevier, 2009. p. 171–194.
- BRAMER, M. **Principles of data mining**. London: Springer, 2007.
- BREVIK, E. C. et al. Soil mapping, classification, and pedologic modeling: history and future directions. **Geoderma**, v. 264, p. 256–274, fev. 2016.
- BROWN, B. **r.to.vect**: ferramenta fo GRASS GIS, 2015. Disponível em: <<https://grass.osgeo.org/grass72/manuals/r.to.vect.html>>. Acesso em: out. 2017.
- BROWN, D. G.; LUSCH, D. P.; DUDA, K. A. Supervised classification of types of glaciated landscapes using digital elevation data. **Geomorphology**, v. 21, n. 3–4, p. 233–250, jan. 1998.
- BURROUGH, P. A.; GAANS, P. F. M. VAN; MACMILLAN, R. A. High-resolution landform classification using fuzzy k-means. **Fuzzy Sets and Systems**, n. 113, p. 37–52, 2000.
- BURROUGH, P. A.; MACDONNELL, R. A. **Principles of geographical information systems**. 6. ed. Oxford: Oxford University Press, 2009.
- CARLSTON, C. W. **Drainage density and streamflow**. United States: United States Department of the Interior, 1963.
- CARVALHO-JUNIOR, W. **Classificação supervisionada de pedopaisagem do domínio dos mares de morros utilizando redes neurais artificiais**. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- CHEN, Y.-C.; SUNG, Q.; CHENG, K.-Y. Along-strike variations of morphotectonic features in the Western Foothills of Taiwan: tectonic implications based on stream-gradient and hypsometric analysis. **Geomorphology**, v. 56, n. 1–2, p. 109–137, nov. 2003.
- CHISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.
- CHORLEY, R. J. Climate and morfometry. **Journal of Geology**, n. 65, p. 628–668, 1957.

CHORLEY, R. J. The application of statistical methods to geomorphology. In: DURY, G. H. (Eds.). **Essays in Geomorphology**. London: Heinemann, 1966. p. 275–387.

CHORLEY, R. J.; KENNEDY, B. A. **Physical geography: a systems approach**. 3. ed. London: Prentice-Hall, 1971. v. 4

CHOW, T. E.; HODGSON, M. E. Effects of lidar post-spacing and DEM resolution to mean slope estimation. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 23, n. 10, p. 1277–1295, out. 2009.

COELHO, F. F.; GIASSON, C. E. Métodos para mapeamento digital de solos com utilização de sistema de informação geográfica. **Ciência Rural**, v. 40, n. 10, p. 2099–2106, 2010.

CSILLIK, O.; EVANS, I. S.; DRĂGUȚ, L. Transformation (normalization) of slope gradient and surface curvatures, automated for statistical analyses from DEMs. **Geomorphology**, v. 232, p. 65–77, 2015.

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

DENG, Y.; WILSON, J. P. Multi-scale and multi-criteria mapping of mountain peaks as fuzzy entities. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 22, n. 2, p. 205–218, fev. 2008.

DIKAU, R. Three dimensional applications in geographical information systems. In: RAPER, J. F. (Ed.). **The application of a digital relief model to landform analysis**. London: Taylor & Francis, 1989. p. 51–77.

DIKAU, R. Geomorphic landform modeling based on hierarchy theory. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL DATA HANDLING, 4. **Proceedings...** Zürich, Switzerland: Department of Geography, University of Zürich, 1990

DIKAU, R. et al. **Morphometric landform analysis of New Mexico**. Berlin: Z. Geomorphology, 1995.

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

DRĂGUȚ, L.; DORNIK, A. Land-surface segmentation as a method to create strata for spatial sampling and its potential for digital soil mapping. **International Journal of Geographical Information Science**, p. 1–18, 2016.

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

DUBAYAH, R.; RICH, P. M. Topographic solar radiation models for GIS. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 9, n. 4, p. 405–419, jul. 1995.

DYMOND, J. R.; DEROSE, R. C.; HARMSWORTH, G. R. Automated mapping of land components from digital elevation data. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 20, n. 2, p. 131–137, mar. 1995.

EASH, D. A. A geographic information system procedure to quantify drainage-basin characteristics. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 30, n. 1, p. 1–8, fev. 1994.

EHLSCHLAEGER, C. **r.water.outlet**: Ferramenta fo GRASS GIS, 2016. Disponível em: <<https://grass.osgeo.org/grass75/manuals/r.water.outlet.html>>. Acesso em: out. 2017.

EMPRESA BRASILEIR DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos - SiBCS**. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2013. 353p.

ESPARZA, M. A. **Serra de Itaqueri**. Itirapina, 2009. Disponível em: <[https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Serra\\_de\\_Itaqueri\\_-\\_panoramio.jpg#metadata](https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Serra_de_Itaqueri_-_panoramio.jpg#metadata)>. Acesso em: 10 jul. 2018.

EVAN, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: CHORLEY, R. J. (Ed.). **Spatial analysis in geomorphology**. London: Methuen, 1972. p. 17–90.

EVANS, I. S. Geomorphometry and landform mapping: what is a landform? **Geomorphology**, v. 137, n. 1, p. 94–106, jan. 2012.

EVERITT, B.; HOTHORN, T. **An introduction to applied multivariate analysis with R**. London: Springer, 2011.

FARR, T. G. et al. The shuttle radar topography mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, 19 maio 2007.

FITZPATRICK, F. A. et al. **Revised methods for characterizing stream habitat in the National Water-Quality Assessment Program**. Raleigh: USGS, 1998. 98p.

FLORINSKY, I. V. **Digital terrain analysis in soil science and geology**. 2.ed. Amsterdam: Academic Press, 2016.

FUJISADA, H.; URAI, M.; IWASAKI, A. Technical methodology for ASTER global DEM. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 50, n. 10, p. 3725–3736, out. 2012.

GALLANT, J. C.; HUTCHINSON, M. F. A differential equation for specific catchment area: a differential equation for specific catchment. **Water Resources Research**, v. 47, n. 5, maio 2011.

GAN-LIN, Z.; FENG<sup>1</sup>, L. I. U.; XIAO-DONG<sup>1</sup>, S. Recent progress and future prospect of digital soil mapping: a review. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 12, n. 16, p. 2871–2885, 2017.



- GESCH, D. B. et al. **The national the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): collection user guide.** Raleigh: USGS, 2002.
- GESSLER, P. E. et al. Soil-landscape modelling and spatial prediction of soil attributes. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 9, n. 4, p. 421–432, jul. 1995.
- GIASSON, E. et al. Digital soil mapping using logistic regression on terrain parameters for several ecological regions in southern Brazil. In: HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. (Eds.). **Digital soil mapping with limited data.** London: Springer, 2008. p. 225–232.
- GILES, P. T. Geomorphological signatures: classification of aggregated slope unit objects from digital elevation and remote sensing data. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 23, n. 7, p. 581–594, jul. 1998.
- GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-the-art and perspectives. **Geoderma**, v. 89, n. 1–2, p. 1–45, abr. 1999.
- GRAVELIUS, H. **Grundrifi der gesamten gewisserkunde:** band I, flufkunde: compendium of hydrology. Berlin: [S.n.], 1914.
- GREGORY, K. J.; WALLING, D. E. The variation of drainage density within a catchment. **Bulletin of the International Association of Scientific Hydrology**, v. 13, n. 2, p. 61–68, 1968.
- GREGORY, K. J.; WALLING, D. E. **Drainage basin form and process: a geomorphological approach.** London: Edward Arnold, 1973.
- GROHMANN, C. H. Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional-scale analysis. **Computers & Geosciences**, v. 77, p. 111–117, abr. 2015.
- GROHMANN, C. H.; SMITH, M. J.; RICCOMINI, C. Multiscale analysis of topographic surface roughness in the Midland Valley, Scotland. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 49, n. 4, p. 1200–1213, abr. 2011.
- HAMMOND, E. H. Classes of land surface form in the forty-eight states, U.S.A. **Annals of the Association of American Geographers**, n. 54, p. 11–19, 1964.
- HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. **Digital soil mapping with limited data.** London: Springer, 2008.
- HARTIGAN, J. A.; WONG, M. A. A K-means clustering algorithm. **Applied Statistics**, v. 28, p. 100–108, 1979.
- HEINE, R. A.; LANT, C. L.; SENGUPTA, R. R. Development and comparison of approaches for automated mapping of stream channel networks. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 94, n. 3, p. 477–490, set. 2004.

HENDERSON, B. L. et al. Australia-wide predictions of soil properties using decision trees. **Geoderma**, v. 124, n. 3–4, p. 383–398, fev. 2005.

HENGL, T.; ROSSITER, D. G. Supervised landform classification to enhance and replace photo-interpretation in semi-detailed soil survey. **Soil Science Society of America Journal**, v. 67, n. 6, p. 1810, 2003.

HEUVELINK, G. B.; WEBSTER, R. Modelling soil variation: past, present, and future. **Geoderma**, v. 100, n. 3–4, p. 269–301, maio 2001.

HIJMANS, J. H. et al. **Package ‘raster’**. 2017. Disponível em: <<https://cran.r-project.org/web/packages/raster/raster.pdf>>. Acesso em: out. 2017.

HORTON, R. E. Drainage-basin characteristics. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 13, n. 1, p. 350, 1932.

HORTON, R. E. Sheet erosion: present and past. **American Geophysical Union**, p. 299–305, 1941.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Remote Sensing**, v. 56, p. 275–370, 1945.

HOVIUS, N. Regular spacing of drainage outlets from linear mountain belts. **Basin Research**, v. 8, n. 1, p. 29–44, mar. 1996.

HURTREZ, J. E.; LUCAZEAU, F. Lithological control on relief and hypsometry in the Hérault drainage basin (France). **Earth and Planetary Sciences**, n. 328, p. 687–694, 1999.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2003.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo agropecuário de 2016**. Rio de Janeiro: IBGE, 2016.

INSTITUTO FLORESTAL. **Inventário florestal do Estado de São Paulo**. São Paulo: IF, 1994.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1981.

IRITANI, M. A.; EZAKI, S. **As águas subterrâneas do Estado de São Paulo**. 2. ed. São Paulo: SMA, 2009.

IRVIN, B. J.; VENTURA, S. J.; SLATER, B. K. Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconsin. **Geoderma**, v. 77, n. 2–4, p. 137–154, jun. 1997.

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, n. 3–4, p. 409–440, maio 2007.

JARVIS, A. et al. **Hole-filled SRTM for the globe version 4**. Disponível em: <<http://srtm.csi.cgiar.org>>. Acesso em: 11 abr. 2018.

JASIEWICZ, J. **r.stream.order**: ferramenta fo GRASS GIS, 2015. Disponível em: <<https://grass.osgeo.org/grass74/manuals/addons/r.stream.order.html>>. Acesso em: out. 2017.

JASIEWICZ, J.; STEPINSKI, T. F. Geomorphons: a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. **Geomorphology**, v. 182, p. 147–156, jan. 2013.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, n. 41, p. 1593–1600, 1988.

KELLNDORFER, J. M.; WALKER, W. S.; PIERCE, L. E.; DOBSON, M. C.; FITES, J.; HUNSAKER, C.; VONA, J.; CLUTTER, M. Vegetation height derivation from Shuttle Radar Topography Mission and National Elevation Data sets. **Remote Sensing of Environment**, n. 93, p. 339–358, 2004.

KELSON, K. I.; WELLS, S. G. Geologic influences on fluvial hydrology and bedload transport in small mountainous watersheds, Northern New Mexico, U.S.A. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 14, n. 8, p. 671–690, dez. 1989.

KUMAR, S.; LAL, R.; LIU, D. A geographically weighted regression kriging approach for mapping soil organic carbon stock. **Geoderma**, v. 189–190, p. 627–634, nov. 2012.

LANGBEIN, W. B. **Topographic characteristics of drainage basins**. Washington: Geological Survey, 1947. p. 125–156.

LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

LINDSAY, J. B.; CREED, I. F. Removal of artifact depressions from digital elevation models: towards a minimum impact approach. **Hydrological Processes**, v. 19, n. 16, p. 3113–3126, 2005.

LP-DAAC. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. Sioux Falls: USGS, 2015.

LU, D.; WENG, Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. **International Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 5, p. 823–870, mar. 2007.

MACIEL, C. **Serra da Mantiqueira**. São Francisco Xavier, 2013. Disponível em: <[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Serra\\_da\\_Mantiqueira.JPG/](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Serra_da_Mantiqueira.JPG/)>. Acesso em: 10 jul. 2018.

MACMILLAN, R. A. et al. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 113, n. 1, p. 81–109, 2000.

MACMILLAN, R. A. **Automated knowledge-based classification of landforms, soils and ecological spatial entities**. 2004. Disponível em: [https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs142p2\\_051701.doc](https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051701.doc)

MACMILLAN, R. A.; SHARY, P. A. Landforms and landform elements in geomorphometry. **Developments in Soil Science**, v. 33p. 227–254, 2009.

MANFRÉ, L. A.; DE ALBUQUERQUE NÓBREGA, R. A.; QUINTANILHA, J. A. Regional and local topography subdivision and landform mapping using SRTM-derived data: a case study in southeastern Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 73, n. 10, p. 6457–6475, maio 2015.

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

MARK, D. M.; SMITH, B. A science of topography: from qualitative ontology to digital representations. In: BISHOP, J. F., SHRODER JUNIOR, M. P. (Eds.). **GIS & mountain geomorphology**. Berlin: Springer, 2004. p. 75–100.

MARTZ, L. W.; GARBRECHT, J. The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models. **Hydrological Processes**, v. 12, n. 6, p. 843–855, maio 1998.

MASEK, J. G. et al. Erosion and tectonics at the margins of continental plateaus. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 99, n. B7, p. 13941–13956, 10 jul. 1994.

MCKENZIE, N. J.; RYAN, P. J. Spatial prediction of soil properties using environmental correlation. **Geoderma**, v. 89, n. 1–2, p. 67–94, abr. 1999.

MELTON, M. A. **An analysis of the relations among elements of climate, surface properties, and geomorphology**. Fort Belvoir, VA: Defense Technical Information Center, 30 set. 1957. Disponível em: <<http://www.dtic.mil/docs/citations/AD0148373>>. Acesso em: 17 mar. 2018.

MENDONÇA-SANTOS, M. L. et al. Digital mapping of soil classes in Rio de Janeiro State, Brazil: data, modelling and prediction. In: HARTEMINK, A. E. et al. (Eds.). **Digital soil mapping with limited data**. London: Springer, 2008. p. 381–398.

MILIARESIS, G. C.; ARGIALAS, D. Segmentation of physiographic features from the global digital elevation model/GTOPO30. **Computers & Geosciences**, v. 25, n. 7, p. 715–728, ago. 1999.

MILLER, V. C. **A Quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee**. New York: Columbia University, 1953.

MIRANDA, E. E. **Brasil em relevo**. Disponível em: <<https://www.cnpm.embrapa.br/projetos/relevobr/index.htm>>. Acesso em: 11 abr. 2018.

MOGLEN, G. E.; ELTAHIR, E. A. B.; BRAS, R. L. On the sensitivity of drainage density to climate change. **Water Resources Research**, v. 34, n. 4, p. 855–862, abr. 1998.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Where do channels begin? **Nature**, v. 336, n. 6196, p. 232–234, nov. 1988.

MONTGOMERY, D. R.; FOUFOULA-GEORGIU, E. Channel network source representation using digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 29, n. 12, p. 3925–3934, dez. 1993.

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, jan. 1991.

MORIYAMA, V. **Vista da cidade de Cubatão**. Cubatão, 2015. Disponível em: <<https://www.oeco.org.br/fotografia/28500-a-recuperacao-da-mata-na-estrada-velha-de-santos/>>. Acesso em: 10 jul. 2018.

MUÑOZ, V. A. **Análise geomorfométrica de dados SRTM aplicada ao estudo das relações solo-relevo**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

MUÑOZ, V. A.; VALERIANO, M. M.; WEILL, M. A. M. Estudo das relações solo-relevo pela análise geomorfométrica de dados SRTM e TOPODATA e a técnica de recuperação de conhecimento a partir de mapas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO (SBSR), 15., Curitiba, PR. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011.

NETELER, M. et al. GRASS GIS: a multi-purpose open source GIS: environmental modelling & software. **Environmental Modelling & Software**, v. 31, p. 124–130, 2012.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, v. 27, n. 2, p. 247, 1984.

OGUCHI, T. Drainage density and relative relief in humid steep mountains with frequent slope failure. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 22, n. 2, p. 107–120, fev. 1997.

- OLDEN, J. D.; POFF, N. L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. **River Research and Applications**, v. 19, n. 2, p. 101–121, mar. 2003.
- OLIVEIRA, J. B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**. Campinas-SP: Instituto Agrônômico - IAC, 1999.
- PALLARD, B.; CASTELLARIN, A.; MONTANARI, A. A look at the links between drainage density and flood statistics. **Hydrology and Earth System Sciences**, n. 13, p. 1019–1029, 2009.
- PEBESMA, E.; GRAELER, B. **Spatial and spatio-temporal geostatistical modelling, prediction and simulation**. Disponível em: <<https://github.com/edzer/gstat/>>. Acesso em: 11 abr. 2018.
- PERSENDT, F. C.; GOMEZ, C. Assessment of drainage network extractions in a low-relief area of the Cuvelai Basin (Namibia) from multiple sources: LiDAR, topographic maps, and digital aerial orthophotographs. **Geomorphology**, v. 260, p. 32–50, maio 2016.
- PIDWIRNY, M. Cloud formation processes. In: PETERSON, J.; SACK, D.; GABLER, R. E. (Eds). **Fundamentals of physical geography**. [S.l.]: Cengage, 2006.
- PIKE, R. J. **A bibliography of terrain modeling (geomorphometry): the quantitative representation of topography**. Reston: USGS, 2002. 158p.
- PIKE, R. J.; EVANS, I. S.; HENGL, T. Geomorphometry: a brief guide. In: HENGL, T.; REUTER, H. (Eds.). **Geomorphometry: concepts, software, applications**. Amsterdam: Elsevier, 2009. p. 3–30.
- PIKE, R. J.; WILSON, S. E. Elevation-relief ratio, hypsometric integral, and geomorphic area-altitude analysis. **Geological Society of America Bulletin**, v. 82, n. 4, p. 1079, 1971.
- PRICE, K. et al. Effects of watershed land use and geomorphology on stream low flows during severe drought conditions in the southern Blue Ridge Mountains, Georgia and North Carolina, United States: effects of watershed land use and geomorphology. **Water Resources Research**, v. 47, n. 2, fev. 2011.
- PRICE, K. Effects of watershed topography, soils, land use, and climate on baseflow hydrology in humid regions: a review. **Progress in Physical Geography**, v. 35, n. 4, p. 465–492, ago. 2011.
- 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, ago. 2006.
- R PROJECT. **R: a language and environment for statistical computing**. Disponível em: <<http://www.R-project.org/>>. Acesso em: 11 abr. 2018.

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, fev. 2003.

RASEMANN, S. et al. Geomorphometry in mountain terrain. In: BISHOP, J. F.; SHRODER JUNIOR, M. P. (Eds.). **GIS & mountain geomorphology**. Berlin: Springer, 2004. p. 101–145.

RENNÓ, C. D. et al. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3469–3481, set. 2008.

RESENDE, M. et al. **Pedologia base para distinção de ambientes**. 6. ed. Lavras: UFLA, 2014.

RICHARDSON, M. C.; FORTIN, M.-J.; BRANFIREUN, B. A. Hydrogeomorphic edge detection and delineation of landscape functional units from lidar digital elevation models: hydrogeomorphic edge detection with lidar. **Water Resources Research**, v. 45, n. 10, out. 2009.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 10, p. 41–56, 1996.

ROSSETTI, D. F.; VALERIANO, M. M. Evolution of the lowest amazon basin modeled from the integration of geological and SRTM topographic data. **CATENA**, v. 70, n. 2, p. 253–265, jul. 2007.

ROYSTON, P. Remark AS R94: a remark on algorithm AS 181: the W test for normality. **Applied Statistics**, v. 44, p. 547–551, 1995.

RUDORFF, B. F. T. et al. Studies on the rapid expansion of sugarcane for ethanol production in São Paulo state (Brazil) using Landsat data. **Remote Sensing**, v. 2, n. 4, p. 1057–1076, 2010.

SANGIREDDY, H. et al. Controls of climate, topography, vegetation, and lithology on drainage density extracted from high resolution topography data. **Journal of Hydrology**, v. 537, p. 271–282, jun. 2016.

SÃO PAULO. SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE. **Rede de drenagem do Estado de São Paulo a partir da base do GISAT (Cartas Topográficas na escala de 1:50.000)**. Disponível em:  
[http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/cpla/2013/10/Ficha\\_Tecnica\\_Drenagem\\_070515.pdf](http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/cpla/2013/10/Ficha_Tecnica_Drenagem_070515.pdf).

SARP, G.; TOPRAK, V.; DUZGUN, S. Activity level of tectonic basins, western section of the North Anatolian Fault Zone, Turkey. **International Geology Review**, v. 55, n. 3, p. 350–366, fev. 2013.

SCHMIDT, J.; DIKAU, R. Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models: semantics, methods, future needs. In: DIKAU, R.; SAURER,

H. (Eds.). **GIS for Earth surface systems: analysis and modelling of the natural environment**. Stuttgart: Schweizbart'sche Verlagsbuchhandlung, 1999. p. 153–173.

SCHMIDT, J.; HEWITT, A. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. **Geoderma**, v. 121, n. 3–4, p. 243–256, ago. 2004.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. **Geological Society of America Bulletin**, v. 67, n. 5, p. 597–646, 1956.

SCULL, P.; FRANKLIN, J.; CHADWICK, O. A. The application of classification tree analysis to soil type prediction in a desert landscape. **Ecological Modelling**, v. 181, n. 1, p. 1–15, jan. 2005.

SETZER, J. **Atlas climático e ecológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: CESP, 1966.

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, maio 2002.

SILVEIRA, C. T. et al. Soil prediction using artificial neural networks and topographic attributes. **Geoderma**, v. 195–196, p. 165–172, mar. 2013.

SILVEIRA, S. **Cuesta de Botucatu**. Botucatu, 2018. Disponível em: <<http://sanderlei.com.br/PT/Ensino-Fundamental/Sao-Paulo-Historia-Geografia-50/>>. Acesso em: 10 jul. 2018.

SINGH, O.; SARANGI, A.; SHARMA, M. C. Hypsometric integral estimation methods and its relevance on erosion status of north-western Lesser Himalayan Watersheds. **Water Resources Management**, v. 22, n. 11, p. 1545–1560, nov. 2008.

SLATER, J. A. et al. The SRTM data “finishing” process and products. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 72, n. 3, p. 237–247, 1 mar. 2006.

SOILLE, P.; VOGT, J.; COLOMBO, R. Carving and adaptive drainage enforcement of grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 39, n. 12, 2003.

STANISLAWSKI, L. V.; FALGOUT, J.; BUTTENFIELD, B. P. Automated extraction of natural drainage density patterns for the conterminous United States through high-performance computing. **The Cartographic Journal**, v. 52, n. 2, p. 185–192, 3 abr. 2015.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 38, n. 6, p. 913, 1957.

STRAHLER, N. A. Quantitative geomorphology of drainage basins and channel networks. In: CHOW, V. T. (Ed.). **Handbook of applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1964. p. 39–76.



- TELLES, R. **Blog Pedale Bem**. Santa Rita do Passa Quatro, 2015. Disponível em: <<http://pedale-bem.blogspot.com/2015/04/pedal-sao-carlos-sp-santa-rita-do-passa.html/>>. Acesso em: 10 jul. 2018.
- TOMA, L. et al. Flow computation on massive grids. In: ACM INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCES IN GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS, 9., 2001. **Proceedings...** 2001.
- TUCKER, G. E. et al. Statistical analysis of drainage density from digital terrain data. **Geomorphology**, v. 36, n. 3–4, p. 187–202, fev. 2001.
- VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v. 32, n. 2, p. 300–309, 2012.
- 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, mar. 2017.
- VALERIANO, M. M. et al. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90m data. **Computers & Geosciences**, v. 32, n. 8, p. 1169–1181, out. 2006.
- VALERIANO, M. M. **Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos, SP: INPE, 2008.
- VALERIANO, M. M.; ALBUQUERQUE, P. C. G. **Topodata: processamento dos dados SRTM**. São José dos Campos, SP: INPE, 2010.
- VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. **Topodata: seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM**. São José dos Campos, SP: INPE, 2010.
- VALLEY, G. **Visão notícias**. Marília, 2015. Disponível em: <[www.visaonoticias.com/](http://www.visaonoticias.com/)>. Acesso em: 10 jul. 2018.
- WARNER, G. S. et al. Watershed characterization by GIS for low flow prediction. In: LYON, J. G. (Ed.). **GIS for water resources and watershed management**. London: Taylor and Francis, 2003. p. 101–107.
- WEBER, E. et al. GIS as a support to soil mapping in southern Brazil. In: HARTEMINK, A. E.; MCBRATNEY, A.; MENDONÇA-SANTOS, M. L. (Eds.). **Digital soil mapping with limited data**. London: Springer, 2008. p. 103–112.
- WEBSTER, R.; OLIVER, M. A. **Geostatistics for environmental scientists**. 2. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.
- 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.

WIECZOREK, M.; MIGONÍ, P. Automatic relief classification versus expert and field based landform classification for the medium-altitude mountain range, the Sudetes, SW Poland. **Geomorphology**, v. 206, p. 133–146, fev. 2014.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (Eds.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: Wiley, 2000.

ZAVOIANU, I. Hypsometric curves and longitudinal stream profiles. In: \_\_\_\_\_ (Ed). **Morphometry of drainage basins**. London: Elsevier, 1985. p. 185–200.

ZHANG, W.; MONTGOMERY, D. R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1019–1028, abr. 1994.

ZHANG, X. et al. Comparison of slope estimates from low resolution DEMs: scaling issues and a fractal method for their solution. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 24, n. 9, p. 763–779, ago. 1999.

## APÊNDICE A – CÓDIGOS PARA OBTENÇÃO DAS VARIÁVEIS GEOMORFOMÉTRICAS DE MICROBACIAS

Observações gerais sobre os códigos:

- Foram gerados dentro do ambiente R (R, 2018) para processamento em conjunto de todas as microbacias hidrográficas (n=477) da área de estudo que compreende o Estado de São Paulo;
- O símbolo # nas linhas de comandos significa que a linha especificada é um comentário;
- Eles não estão necessariamente numa ordem cronológica.

### CÓDIGO A1: Delimitação de microbacias

**Principais funções:** r.water.outlet e r.to.vect

**Entrada:** coordenadas dos exutórios e direção de fluxo

**Saída:** limites (bordas) das microbacias no formato shapefile

**Observações:** As principais ferramentas utilizadas foram do GRASS GIS. Foram criados dois tipos de arquivos em shapefile: com e sem suavização das bordas

```
#Bibliotecas do R
library("raster")
library("maptools")
library("rgdal")
library("spgrass6")
#Diretório
setwd("I:/BD/Topo")
#Direção de fluxo - Output do GRASS
inp <- "tf_flowDir.tif"
file.copy(inp,"dado", overwrite=TRUE)
#Definição do diretório do GRASS
loc <- initGRASS("C:/Program Files (x86)/GRASS GIS 6.4.4", home=tempdir())
#Importação do dado de entrada para o ambiente GRASS
execGRASS("r.in.gdal", flags="o", parameters=list(input="dado", output="flowDir"))
#Definição da região
execGRASS("g.region", parameters=list(rast="flowDir"))
#Exutórios das microbacias com as coordenadas
pontos <- readShapePoints("Amostras.shp")
pontos <- as.data.frame(pontos)
##Loop para extração de todas as microbacias
#Número de microbacias
file.number <- 477
counter = 1
for(i in 1:file.number) {
  outfile <- paste0("bacia",counter,"_",as.numeric(as.character(pontos[counter,6])))
  #Coordenadas
```

```

x <- as.numeric(as.character(pontos[counter,1]))
y <- as.numeric(as.character(pontos[counter,2]))
#Extração
execGRASS("r.water.outlet", flags="overwrite", parameters=list(drainage="flowDir",
basin="bacia", easting=paste(x), northing=paste(y)))
##Conversão para vetor
#Com suavizaçã das bordas
execGRASS("r.to.vect", flags=c("s","overwrite"), parameters=list(input="bacia",
output="bacia_v",feature="area"))
#Sem suavização das bordas
execGRASS("r.to.vect", flags=c("overwrite"), parameters=list(input="bacia",
output="bacia_v2",feature="area"))
#Exportação das bacias para shapefile com bordas suavizados
execGRASS("v.out.ogr", flags=c("e", "c"), parameters=list(input="bacia_v", type="area",
dsn="I:/BD/Bacias2/Suave", olayer=outfile, format="ESRI_Shapefile"))
#Exportação das bacias para shapefile com bordas sem suavização
execGRASS("v.out.ogr", flags=c("e", "c"), parameters=list(input="bacia_v2", type="area",
dsn="I:/BD/Bacias2", olayer=outfile, format="ESRI_Shapefile"))
counter = counter + 1
}

```

## CÓDIGO A2: Conversão de vetor para raster

**Principais funções:** extent, rasterize e raster

**Entrada:** microbacias no formato shapefile

**Saída:** microbacias no formato raster

**Observações:** As ferramentas extent e raster foram utilizadas com o objetivo de gerar resultados com uma mesma resolução espacial

```

#Bibliotecas do R
library("raster")
library("maptools")
library("rgdal")
library("rgeos")
#Arquivo modelo para definição da resolução e do sistema de coordenadas
setwd("I:/BD/Topo")
mde <- raster("mde.tif")
p <- crs(mde)
#Diretório com os arquivos
setwd("I:/BD/Bacias2")
file.list <- dir(pattern = ".shp")
file.number <- 477
counter = 1
for(i in 1:file.number) {
#Diretório de entrada
setwd("I:/BD/Bacias2")
infile <- file.list[counter]
outfile <- gsub(".shp",".tif",infile)
bacia = readShapePoly(infile, delete_null_obj=TRUE)
crs(bacia) <- p
e <- extent(bacia)
r <- raster(ext=e, resolution=res(mde),crs=p)
baciaR <- rasterize(x=bacia,y=r)
#Diretório de saída

```

```

setwd("I:/BD/Bacias2/tiff")
writeRaster(baciaR, filename=outfile, format="GTiff",
dataTyoe="FLT4S",overwrite=TRUE)
counter = counter + 1
}

```

**CÓDIGO A3:** Operação de sobreposição entre a rede de drenagem e os limites de cada microbacia

**Principais funções:** crop, extent e interseção (multiplicação)

**Entrada:** rede de drenagem de toda a área e limite das microbacias

**Saída:** Drenagem para cada microbacia no formato raster

**Observações:** As ferramentas crop e extent fora utilizadas para eliminar valores nulos dalém do quadrante que recobre cada microbacia

```

#Bibliotecas do R
library("raster")
library("mapproj")
library("rgdal")
library("spgrass6")
#Diretório e drenagem de entrada
setwd("I:/BD/Topo")
drenagem <- raster("drenagem.tif")
#Diretório das microbacias em formato raster
setwd("I:/BD/Bacias2/tiff")
##Loop para individualizar todas das drenagens para as 477 microbacias
#Lista de microbacias
file.list <- dir(pattern = ".tif")
file.number <- 477
counter = 1
for(i in 1:file.number) {
#Diretório de entrada
setwd("I:/BD/Bacias2/tiff")
#No do arquivo de entrada
infile <- file.list[counter]
#Leitura da microbacia de entrada
bacia <- (raster(infile))*0+1
#Extensão (coordenadas) da microbacia
e <- extent(bacia)
#Multiplicação da microbacia (com valor 1) com a rede de drenagem para gerar a drenagem
dos limites da microbacia
inters <- bacia*drenagem
#Comando para retirar valores nulos (NA) da área que excede o tamanho do quadrante da
microbacia
inters <- crop(inters, e)
#Salvar a drenagem individualizada
setwd("I:/BD/Rios2")
writeRaster(inters, filename=infile, format="GTiff", dataTyoe="INT1U",overwrite=TRUE)
counter <- counter+1
}

```

**CÓDIGO A4:** Individualização dos canais de mesma ordem Strahler, para geração de um arquivo para cada ordem e microbacia

**Principais funções:** reclassify e writeRaster

**Entrada:** Drenagens de cada microbacia

**Saída:** Drenagem de cada ordem de cada microbacia

**Observações:** Esse processo foi elaborado para conversão posterior dos canais para o formato shapefile. A conversão sem a individualização estava sujeita a muitos erros grosseiros na drenagem resultante

```
#Bibliotecas do R
library(raster)
#Diretório dos raster da drenagem classificada (Strahler) para cada microbacia
setwd("I:/BD/Rios2/Strahler")
#Matrizes 3x3 para reclassificação das drenagens
m <- c(0, 1.1, 1, 1.9, 10, NA)
o1 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
m <- c(0, 1.1, NA, 1.9, 2.2, 1,2.2,10,NA)
o2 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
m <- c(0, 2.1, NA, 2.9, 3.2, 1,3.2,10,NA)
o3 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
m <- c(0, 3.1, NA, 3.9, 4.2, 1,4.2,10,NA)
o4 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
m <- c(0, 4.1, NA, 4.9, 5.2, 1,5.2,10,NA)
o5 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
m <- c(0, 5.1, NA, 5.9, 6.2, 1,6.2,10,NA)
o6 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
m <- c(0, 6.1, NA, 6.9, 7.2, 1,7.2,10,NA)
#Loop para processamento de todas as microbacias
file.list <- dir(pattern = ".tif")
file.number <- 477
counter = 1
for(i in 1:file.number) {
#Redefinição do diretório
setwd("I:/BD/Rios2/Strahler")
infile <- file.list[counter]
Rio <- raster(infile)
out <- gsub(".tif", "", infile)
#Reclassificação dos canais, Ordem 1 a 6
dren_o1 <- reclassify(Rio, o1)
dren_o2 <- reclassify(Rio, o2)
dren_o3 <- reclassify(Rio, o3)
dren_o4 <- reclassify(Rio, o4)
dren_o5 <- reclassify(Rio, o5)
dren_o6 <- reclassify(Rio, o6)
#Salvando dos canais de cada ordem em um novo diretório
setwd("I:/BD/Rios2/Strahler/ordensTiff")
writeRaster(dren_o1, filename=paste0(out, "_o1.tif"), format="GTiff",
dataType="FLT4S",overwrite=TRUE)
writeRaster(dren_o2, filename=paste0(out, "_o2.tif"), format="GTiff",
dataType="FLT4S",overwrite=TRUE)
writeRaster(dren_o3, filename=paste0(out, "_o3.tif"), format="GTiff",
dataType="FLT4S",overwrite=TRUE)
writeRaster(dren_o4, filename=paste0(out, "_o4.tif"), format="GTiff",
dataType="FLT4S",overwrite=TRUE)
```

```

writeRaster(dren_o5, filename=paste0(out,"_o5.tif"), format="GTiff",
dataType="FLT4S",overwrite=TRUE)
writeRaster(dren_o6, filename=paste0(out,"_o6.tif"), format="GTiff",
dataType="FLT4S",overwrite=TRUE)
counter = counter+1
}

```

## **CÓDIGO A5:** Conversão de raster para shape

**Principais funções:** r.to.vect e v.out.ogr

**Entrada:** Drenagens de cada ordem de cada microbacia no formato raster

**Saída:** Drenagem de cada ordem de cada microbacia no formato shapefile

**Observações:** Foram utilizadas ferramentas do GRASS

```

#Bibliotecas do R
library("raster")
library("maptools")
library("rgdal")
library("spgrass6")
#Arquivo modelo somente para definição da região no GRASS
setwd("I:/BD/Topo")
inp <- "tf_order.tif"
file.copy(inp,"dado", overwrite=TRUE)
#Location of your GRASS installation:
loc <- initGRASS("C:/Program Files (x86)/GRASS GIS 6.4.4", home=tempdir())
#Importação do dado de entrada
execGRASS("r.in.gdal", flags="o", parameters=list(input="dado", output="drenagem"))
#Definição da região
execGRASS("g.region", parameters=list(rast="drenagem"))
#Arquivos da drenagem em raster - Um arquivo para cada ordem para cada microbacia
setwd("I:/BD/Rios2/Strahler/ordensTiff")
#Listar os arquivos
file.list <- dir(pattern = ".tif")
#Loop para processar todos os arquivos
file.number <- 3000
counter = 1
for(i in 1:file.number) {
#Redefinindo o diretório
setwd("I:/BD/Rios2/Strahler/ordensTiff")
infile <- file.list[counter]
outfile <- gsub(".tif","",infile)
file.copy(infile,"dado", overwrite=TRUE)
#Importação para o GRASS
execGRASS("r.in.gdal", flags=c("o","overwrite"), parameters=list(input="dado",
output="dren"))
#Raster para Vetor
execGRASS("r.to.vect", flags="overwrite", parameters=list(input="dren",
output="dren_v",feature="line"))
#Exportação do arquivo
execGRASS("v.out.ogr", flags=c("e", "c"), parameters=list(input="dren_v", type="line",
dsn="I:/BD/Rios2/Strahler/ordensShape", olayer=outfile, format="ESRI_Shapefile"))
counter = counter + 1
}

```

**CÓDIGO A6:** Localização do exutório e do ponto mais distante do exutório; distância entre o exutório e o ponto mais distante do exutório, elevação do exutório e elevação do ponto mais distante do exutório

**Principais funções:** sqrt e which.max

**Entrada:** Fluxo acumulado, MDE e limite das microbacias

**Saída:** Planilha com valores calculados para cada microbacia

**Observações:** Considerou-se o exutório como o ponto com maior fluxo acumulado

```
#Bibliotecas do R
library("raster")
library("maptools")
library("rgdal")
library("data.table")
#Fluxo acumulado
acc <- raster("I:/BD/Topo/tf_acc.tif")
#MDE
mde <- raster("I:/BD/Topo/mde.tif")
titulo <-
c("File_name", "x_Exut", "y_Exut", "x_MaxDist", "y_MaxDist", "Ele_Exut", "Ele_MaxDist", "
Dist")
data_info <-
rbind(c(NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA),c(NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA))
colnames(data_info) <- titulo
#Bacia
#Arquivo da drenagem em raster
setwd("I:/BD/Bacias2/tiff")
#Loop para processamento de todas as microbacias
file.list <- dir(pattern = ".tif")
file.number <- 477
counter = 1
for(i in 1:file.number) {
infile <- file.list[counter]
bacia <- (raster(infile))*0+1
e <- extent(bacia)
acc2 <- crop(acc,e)
mde2 <- crop(mde,e)
bacia <- resample(x=bacia, y=acc2, method="ngb")
acc2 <- bacia*acc
mde2 <- bacia*mde2
data <- as.data.frame(acc2,xy=TRUE)
mde2 <- as.data.frame(mde2)
data <- data.frame(data,mde2)
data <- data[order(data[,3],na.last=NA),]
colnames(data) <- c("x", "y", "acc", "mde")
m <- data[which.max(data$acc),]
x1_g <- m[1,1]
y1_g <- m[1,2]
data["d"] <- sqrt((data[,1]-x1_g)^2 + (data[,2]-y1_g)^2)
l <- data[which.max(data$d),]
x2_g <- l[1,1]
y2_g <- l[1,2]
data[,1] <- data[,1]
data[,2] <- data[,2]
m <- data[which.max(data$acc),]
x1 <- m[1,1]
y1 <- m[1,2]
```



```

ele_exut <- m[1,4]
data["d"] <- sqrt((data[,1]-x1)^2 + (data[,2]-y1)^2)
#Distancia entre exutório e ponto mais distante na bacia
distancia <- round(as.numeric(data[which.max(data$d),][5]),digits=2)
#Elevação do ponto mais distante da bacia
Elev_dist <- as.numeric(data[which.max(data$d),][4])
#Armazenamento na planilha
info <- c(infile,x1_g,y1_g,x2_g,y2_g,ele_exut,Elev_dist,distancia)
data_info <- rbind(data_info,info)
counter <- counter+1
}
#Salvando a planilha
write.table(data_info,file="DistanciaExutorioMax.csv",col.names= TRUE,
row.names=FALSE, sep=";",dec = ",")

```

### CÓDIGO A7: Extração do canal principal das microbacias

**Principais funções:** cellStats e reclassify

**Entrada:** Drenagem classificada

**Saída:** Canal principal de cada microbacia

**Observações:** A rede de drenagem utilizada foi classificada pelo método de Horton (1945), que classifica a drenagem principal como a ordem de maior valor

```

#Bibliotecas do R
library("raster")
library("maptools")
library("rgdal")
#Diretório das drenagens classificadas para cada microbacia
setwd("I:/BD/Rios2/Horton")
##Loop para processar todas as microbacias
#Lista das drenagens das microbacias
file.list <- dir(pattern = ".tif")
file.number <- 477
counter = 1
for(i in 1:file.number) {
setwd("I:/BD/Rios2/Horton")
infile <- file.list[counter]
Rio <- raster(infile)
maximo <- cellStats(Rio, stat="max")
##Reclassificação da drenagem, canal principal=1 e demais canais=NA
#Obs.: O canal principal é que apresenta o maior valor na classificação de Horton
m <- c(0, maximo - 0.1, NA, maximo-0.2, maximo+20,NA)
rclmat <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
rc <- reclassify(Rio, rclmat)
#Salvar o canal principal de cada microbacia
setwd("I:/BD/Rios2/Principal")
writeRaster(rc, filename=infile, format="GTiff", dataType="INT1U",overwrite=TRUE)
counter <- counter+1
}

```

### CÓDIGO A8: Obtenção da ordem de cada microbacia

**Principais funções:** cellStats

**Entrada:** Drenagem de cada microbacia classificada segundo Strahler

**Saída:** Planilha com as ordens de cada microbacia

**Observações:** A ordem da microbacia é determinada de acordo com a ordem Strahler dos canais mais elevada

```
#Bibliotecas do R
library(raster)
#Diretório com o limite das microbacias no formato raster
setwd("I:/BD/Bacias2/tiff")
#Planilha com os IDs das microbacias e com a ordem
Titulos <- c("Bacia","ordem")
b_mb <- c(1,1)
b_mb <- rbind(b_mb,b_mb)
colnames(b_mb) <- Titulos
file.list <- dir(pattern = ".tif")
file.number <- 477
counter = 1
for(i in 1:file.number) {
infile <- file.list[counter]
#Diretório com as drenagens de cada microbacia classificada segundo Strahler
setwd("I:/BD/Rios2/Strahler")
#Leitura do arquivo
dren <- raster(infile)
ordem <- cellStats((dren), stat="max")
#Armazenamento os valores na planilha
b_mb1 <- c(infile,ordem)
b_mb <- rbind(b_mb,b_mb1)
counter = counter+1
}
#Salvando a planilha
write.table(b_mb,file="ordem.csv",col.names= TRUE, row.names=FALSE, sep=";",dec =
";")
```

**CÓDIGO A9:** Cálculo de área e perímetro das microbacias

**Principais funções:** gLength e gArea

**Entrada:** Limite das microbacias em shapefile

**Saída:** Planilha com a área e o perímetro de cada microbacia

**Observações:** O perímetro e área foram calculados com os shapefiles das microbacias com bordas suavizadas

```
#Bibliotecas do R
library("raster")
library("mapproj")
library("rgdal")
library("rgeos")
#Planilha com as colunas a serem preenchidas
titulo <- c("File_name","Perimetro","Area")
data_info <- rbind(c(NA,NA,NA),c(NA,NA,NA))
colnames(data_info) <- titulo
#Diretório com as microbacias
```

```

setwd("I:/BD/Bacias2")
##Loop para processar todas as microbacias
file.list <- dir(pattern = ".shp")
file.number <- 477
counter = 1
for(i in 1:file.number) {
#Nome da microbacia
infile <- file.list[counter]
#Leitura da microbacia
bacia = readShapePoly(infile, delete_null_obj=TRUE)
#Cálculo
Per <- gLength(bacia, byid=FALSE)
Area <- gArea(bacia)
info <- c(infile,Per,Area)
#Armazenamento dos calculos na planilha pela inclusão de colunas
data_info <- rbind(data_info,info)
counter =counter+1
}
#Salvando todas as informações calculadas
write.table(data_info,file="AreaPerimBacia.csv",col.names= TRUE, row.names=FALSE,
sep=";",dec = ",")

```

## **CÓDIGO A10:** Comprimento médio e declividade média dos canais de cada ordem

**Principais funções:** gLength e rasterize

**Entrada:** MDE, drenagem em shapefile e microbacias no formato raster

**Saída:** Planilha com os valores calculados para cada microbacia

**Observações:** A declividade média é obtida pela relação entre amplitude da elevação do canal e seu comprimento

```

#Bibliotecas do R
library("raster")
library("maptools")
library("rgdal")
library("rgeos")
#Diretório
setwd("I:/BD/Topo")
#MDE da área de estudo
mde <- raster("mde.tif")
p <- crs(mde)
#Diretório para definição dos nomes das 477 microbacias
setwd("I:/BD/Rios2/Strahler/Shape")
##Loop para processar todas as microbacias
file.list <- dir(pattern = ".shp")
file.number <- 477
counter = 1
#Planilha com o nome das colunas, sendo a primeira linha preenchida com valores nulos
titulo <-
c("Bacia","MediaDeclO1","MediaDeclO2","MediaDeclO3","MediaDeclO4","MediaDeclO
5","MediaDeclO6","Comp_o1","Comp_o2","Comp_o3","Comp_o4","Comp_o5","Comp_o
6")
data_info <-
rbind(c(NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA),c(NA,NA,NA,NA,NA,NA,
NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA))
colnames(data_info) <- titulo

```

```

#Diretório com os canais de cada ordem / Cada arquivo contém os canais de determinada
ordem
setwd("I:/BD/Rios2/Strahler/ordensShape")
file.list2 <- dir(pattern = ".shp")
for(i in 1:length(file.list2)) {
#Redefinição do diretório
setwd("I:/BD/Rios2/Strahler/ordensShape")
infile <- file.list2[i]
infile <- gsub(".shp","",infile)
in_o1 <- paste0(infile,"_o1.shp")
in_o2 <- paste0(infile,"_o2.shp")
in_o3 <- paste0(infile,"_o3.shp")
in_o4 <- paste0(infile,"_o4.shp")
in_o5 <- paste0(infile,"_o5.shp")
in_o6 <- paste0(infile,"_o6.shp")
n3 <- charmatch(x=in_o3, table=file.list2,nomatch=0)
n4 <- charmatch(x=in_o4, table=file.list2,nomatch=0)
n5 <- charmatch(x=in_o5, table=file.list2,nomatch=0)
n6 <- charmatch(x=in_o6, table=file.list2,nomatch=0)
in_o3 <- ifelse(n3 > 0, in_o3, in_o1)
in_o4 <- ifelse(n4 > 0, in_o4, in_o1)
in_o5 <- ifelse(n5 > 0, in_o5, in_o1)
in_o6 <- ifelse(n6 > 0, in_o6, in_o1)
Rio_o1 = readShapeLines(in_o1, delete_null_obj=TRUE)
Rio_o2 = readShapeLines(in_o2, delete_null_obj=TRUE)
Rio_o3 = readShapeLines(in_o3, delete_null_obj=TRUE)
Rio_o4 = readShapeLines(in_o4, delete_null_obj=TRUE)
Rio_o5 = readShapeLines(in_o5, delete_null_obj=TRUE)
Rio_o6 = readShapeLines(in_o6, delete_null_obj=TRUE)
#Leitura da bacia hidrográfica
#Redefinição do diretório
setwd("I:/BD/Bacias2/tiff")
infile2 <- paste0(infile, ".tif")
bacia <- raster(infile2)
Rio_o1$Comp <- as.vector(gLength(Rio_o1, byid=TRUE))
Rio_o1$value <- 1
Rio_o2$Comp <- as.vector(gLength(Rio_o2, byid=TRUE))
Rio_o2$value <- 2
Rio_o3$Comp <- as.vector(gLength(Rio_o3, byid=TRUE))
Rio_o3$value <- 3
Rio_o4$Comp <- as.vector(gLength(Rio_o4, byid=TRUE))
Rio_o4$value <- 4
Rio_o5$Comp <- as.vector(gLength(Rio_o5, byid=TRUE))
Rio_o5$value <- 5
Rio_o6$Comp <- as.vector(gLength(Rio_o6, byid=TRUE))
Rio_o6$value <- 6
data <- Rio_o2+Rio_o3+Rio_o4+Rio_o5+Rio_o6+Rio_o1
data$ID <- 1:nrow(data)
data2 <- as.SpatialLines.SLDF(data)
RioComp <- rasterize(x=data2,y=bacia,field=data@data[3])
RioID <- rasterize(x=data2,y=bacia,field=data@data[4])
RioOrdem <- rasterize(x=data2,y=bacia,field=data@data[2])
#Elevação dos Rios
e <- extent(bacia)
mde2 <- crop(mde,e)
Elev <- (RioID*0+1)*mde2

```

```

data <-
data.frame(as.data.frame(RioID),as.data.frame(RioOrdem),as.data.frame(RioComp),as.data
.frame(Elev))
colnames(data) <- c("RioID","RioOrdem","RioComp","Elev")
data <- data[order(data[,1],na.last=NA),]
data_min <- aggregate(data, by=list(data[,1]),FUN="min")
data_max <- aggregate(data, by=list(data[,1]),FUN="max")
data_agg <- data.frame(data_min[,2:5],data_max[,5])
#Organização dos valores
colnames(data_agg) <- c("RioID","RioOrdem","RioComp","Elev_min","Elev_max")
#Amplitude da elevação de cada canal
data_agg["Amp"] <- data_agg[,5]-data_agg[,4]
#Declividade em radianos
data_agg["Decl"] <- (atan(data_agg[,6]/data_agg[,3]))*180/pi
#Declividade média dos segmentos com base na amplitude e no comprimento (em Graus)
Sub_o1 <- subset(data_agg,RioOrdem==1)
Sub_o2 <- subset(data_agg,RioOrdem==2)
Sub_o3 <- subset(data_agg,RioOrdem==3)
Sub_o4 <- subset(data_agg,RioOrdem==4)
Sub_o5 <- subset(data_agg,RioOrdem==5)
Sub_o6 <- subset(data_agg,RioOrdem==6)
MediaDeclO1 <- (sum(Sub_o1[,7]*Sub_o1[,3]))/(sum(Sub_o1[,3]))
MediaDeclO2 <- (sum(Sub_o2[,7]*Sub_o2[,3]))/(sum(Sub_o2[,3]))
MediaDeclO3 <- (sum(Sub_o3[,7]*Sub_o3[,3]))/(sum(Sub_o3[,3]))
MediaDeclO4 <- (sum(Sub_o4[,7]*Sub_o4[,3]))/(sum(Sub_o4[,3]))
MediaDeclO5 <- (sum(Sub_o5[,7]*Sub_o5[,3]))/(sum(Sub_o5[,3]))
MediaDeclO6 <- (sum(Sub_o6[,7]*Sub_o6[,3]))/(sum(Sub_o6[,3]))
Comp_o1 <- sum(Rio_o1$Comp)
Comp_o2 <- sum(Rio_o2$Comp)
Comp_o3 <- sum(Rio_o3$Comp)
Comp_o4 <- sum(Rio_o4$Comp)
Comp_o5 <- sum(Rio_o5$Comp)
Comp_o6 <- sum(Rio_o6$Comp)
Comp_o3 <- ifelse(n3 > 0, Comp_o3, NA)
Comp_o4 <- ifelse(n4 > 0, Comp_o4, NA)
Comp_o5 <- ifelse(n5 > 0, Comp_o5, NA)
Comp_o6 <- ifelse(n6 > 0, Comp_o6, NA)
#Armazenamento de uma linha na tabela de valores
data_info1 <-
c(infile,MediaDeclO1,MediaDeclO2,MediaDeclO3,MediaDeclO4,MediaDeclO5,MediaDe
clO6,Comp_o1,Comp_o2,Comp_o3,Comp_o4,Comp_o5,Comp_o6 )
data_info <- rbind(data_info,data_info1)
counter = counter+1
}
#Redefinição do diretório para salvar a tabela com todos os valores
write.table(data_info,file="Drecl_Elev_Dist_drenagem_Novo.csv",col.names= TRUE,
row.names=FALSE, sep=";",dec = ",")

```

### **CÓDIGO A11:** Variáveis a partir do *HAND*

**Principais funções:** cellStats e reclassify

**Entrada:** *HAND*, declividade e limite das microbacias em raster

**Saída:** Planilha com os valores calculados para cada microbacia

**Observações:** A descrição das variáveis estão na Tabela 4.1 e 4.2

```

#Bibliotecas do R
library(raster)
#Declividade
setwd("I:/BD/Topo")
decl <- raster("declividade.tif")
decl <- (atan(decl/100))*180/pi
#Raster de entrada
setwd("I:/BD")
hand <- raster("HAND.tif")
#Reamostragem para garantir alinhamento dos pixels
hand <- resample(x=hand, y=decl, method="ngb")
#Redefinição do diretório com as microbacias em raster
setwd("I:/BD/Bacias2/tiff")
#Planilha para as variáveis
Titulos <-
c("Bacia","hand_media","hand_max","p_hand5","hand5_medio","decl_media_hand5","dec
l_p90_hand5","p_hand10","hand10_medio","decl_media_hand10","decl_p90_hand10","p_
hand15","hand15_medio","decl_media_hand15","decl_p90_hand15")
b_mb <- c(1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1,1)
b_mb <- rbind(b_mb,b_mb)
colnames(b_mb) <- Titulos
#Loop para processamento de todas as microbacias
#Listagem de todos os arquivos
file.list <- dir(pattern = ".tif")
file.number <- 477
counter = 1
for(i in 1:file.number) {
infile <- file.list[counter]
bacia <- raster(infile)
bacia <- (bacia*0)+1
e <- extent(bacia)
decl2 <- crop(decl,e)
decl2 <- bacia*decl2
hand2 <- crop(hand,e)
hand2 <- bacia*hand2
#hand médio
hand_media <- cellStats((hand2), stat="mean")
#hand máximo
hand_max <- cellStats((hand2), stat="max")
#Total de célula
total <- cellStats((bacia), stat="sum")
#percentil 90
p90 <- function(x,...) {quantile(x, p=0.90, type = 1,na.rm=TRUE)}
#hand menor que 5 m
m <- c(-1, 5, 1, 5, 10000, NA)
h5 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
h5 <- reclassify(hand2, h5)
p_hand5 <- ((cellStats((h5), stat="sum"))/total)*100
hand5_medio <- cellStats((h5*hand2), stat="mean")
decl_media_hand5 <- cellStats((h5*decl2), stat="mean")
decl_p90_hand5 <- as.numeric(cellStats((h5*decl2), stat=p90))
#hand menor que 10 m
m <- c(-1, 10, 1, 10, 10000, NA)
h10 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
h10 <- reclassify(hand2, h10)
p_hand10 <- ((cellStats((h10), stat="sum"))/total)*100
hand10_medio <- cellStats((h10*hand2), stat="mean")
decl_media_hand10 <- cellStats((h10*decl2), stat="mean")

```

```

decl_p90_hand10 <- as.numeric(cellStats((h10*decl2), stat=p90))
#hand menor que 15 m
m <- c(-1, 15, 1, 15, 10000, NA)
h15 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
h15 <- reclassify(hand2, h15)
p_hand15 <- ((cellStats((h15), stat="sum"))/total)*100
hand15_medio <- cellStats((h15*hand2), stat="mean")
decl_media_hand15 <- cellStats((h15*decl2), stat="mean")
decl_p90_hand15 <- as.numeric(cellStats((h15*decl2), stat=p90))
#Armazenamento na planilha
b_mb1 <-
c(infile,hand_media,hand_max,p_hand5,hand5_medio,decl_media_hand5,decl_p90_hand5,
p_hand10,hand10_medio,decl_media_hand10,decl_p90_hand10,p_hand15,hand15_medio,
decl_media_hand15,decl_p90_hand15)
b_mb <- rbind(b_mb,b_mb1)
counter = counter+1
}
#Salvando a planilha com todas as informações
write.table(b_mb,file="hand2.csv",col.names= TRUE, row.names=FALSE, sep=";",dec =
",")

```

## CÓDIGO A12: Contagem do número de canais de cada ordem

**Principais funções:** reclassify e aggregate

**Entrada:** Drenagem classificada segundo Strahler, drenagem com identificadores dos canais (Ambas foram geradas no GRASS GIS) e limite das microbacias em raster

**Saída:** Planilha com os valores calculados para cada microbacia

```

#Bibliotecas do R
library("raster")
library("maptools")
library("rgdal")
library("rgeos")
#Diretório com a drenagem com ID para cada canal (output do GRASS) e da drenagem
classificada pelo método de Strahler (output do GRASS)
setwd("I:/BD/Topo")
stream <- raster("tf_stream.tif")
ordem <- raster("tf_order.tif")
#Planilha com as variáveis a serem criadas (número de segmentos para cada ordem)
titulo <-
c("File_name","nSeg_ordem1","nSeg_ordem2","nSeg_ordem3","nSeg_ordem4","nSeg_ord
em5","nSeg_ordem6","nSeg_ordem7","nSeg_ordem8","nSeg_ordem9")
data_info <-
rbind(c(NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA),c(NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,NA,
NA))
colnames(data_info) <- titulo
#Matrizes de reclassificação de planos de informação
m <- c(0, 1.1, 1, 1.9, 10, NA)
o1 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
m <- c(0, 1.1, NA, 1.9, 2.2, 1,2.2,10,NA)
o2 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
m <- c(0, 2.1, NA, 2.9, 3.2, 1,3.2,10,NA)
o3 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)

```

```

m <- c(0, 3.1, NA, 3.9, 4.2, 1,4.2,10,NA)
o4 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
m <- c(0, 4.1, NA, 4.9, 5.2, 1,5.2,10,NA)
o5 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
m <- c(0, 5.1, NA, 5.9, 6.2, 1,6.2,10,NA)
o6 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
m <- c(0, 6.1, NA, 6.9, 7.2, 1,7.2,10,NA)
o7 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
m <- c(0, 7.1, NA, 7.9, 8.2, 1,8.2,10,NA)
o8 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
m <- c(0, 8.1, NA, 8.9, 9.2, 1,9.2,10,NA)
o9 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
#Diretório com as microbacias no formato raster
setwd("I:/BD/Bacias2/tiff")
#Loop para processamento de todos os arquivos
file.list <- dir(pattern = ".tif")
file.number <- 477
counter = 1
for(i in 1:file.number) {
infile <- file.list[counter]
bacia <- raster(infile)
bacia <- bacia*0+1
e <- extent(bacia)
stream2 <- crop(stream,e)
ordem2 <- crop(ordem,e)
stream2 <- bacia*stream2
ordem2 <- bacia*ordem2
#Reclassificação
dren_o1 <- reclassify(ordem2, o1)
dren_o2 <- reclassify(ordem2, o2)
dren_o3 <- reclassify(ordem2, o3)
dren_o4 <- reclassify(ordem2, o4)
dren_o5 <- reclassify(ordem2, o5)
dren_o6 <- reclassify(ordem2, o6)
dren_o7 <- reclassify(ordem2, o7)
dren_o8 <- reclassify(ordem2, o8)
dren_o9 <- reclassify(ordem2, o9)
dren_o1 <- dren_o1*stream2
dren_o1 <- data.frame(as.data.frame(dren_o1),as.data.frame(dren_o1))
dren_o1 <- aggregate(dren_o1, by=list(dren_o1[,1]),FUN="min")
nSeg_ordem1 <- nrow(dren_o1)
dren_o2 <- dren_o2*stream2
dren_o2 <- data.frame(as.data.frame(dren_o2),as.data.frame(dren_o2))
dren_o2 <- aggregate(dren_o2, by=list(dren_o2[,1]),FUN="min")
nSeg_ordem2 <- nrow(dren_o2)
dren_o3 <- dren_o3*stream2
dren_o3 <- data.frame(as.data.frame(dren_o3),as.data.frame(dren_o3))
dren_o3 <- aggregate(dren_o3, by=list(dren_o3[,1]),FUN="min")
nSeg_ordem3 <- nrow(dren_o3)
dren_o4 <- dren_o4*stream2
dren_o4 <- data.frame(as.data.frame(dren_o4),as.data.frame(dren_o4))
dren_o4 <- aggregate(dren_o4, by=list(dren_o4[,1]),FUN="min")
nSeg_ordem4 <- nrow(dren_o4)
dren_o5 <- dren_o5*stream2
dren_o5 <- data.frame(as.data.frame(dren_o5),as.data.frame(dren_o5))
dren_o5 <- aggregate(dren_o5, by=list(dren_o5[,1]),FUN="min")
nSeg_ordem5 <- nrow(dren_o5)
dren_o6 <- dren_o6*stream2

```



```

dren_o6 <- data.frame(as.data.frame(dren_o6),as.data.frame(dren_o6))
dren_o6 <- aggregate(dren_o6, by=list(dren_o6[,1]),FUN="min")
nSeg_ordem6 <- nrow(dren_o6)
dren_o7 <- dren_o7*stream2
dren_o7 <- data.frame(as.data.frame(dren_o7),as.data.frame(dren_o7))
dren_o7 <- aggregate(dren_o7, by=list(dren_o7[,1]),FUN="min")
nSeg_ordem7 <- nrow(dren_o7)
dren_o8 <- dren_o8*stream2
dren_o8 <- data.frame(as.data.frame(dren_o8),as.data.frame(dren_o8))
dren_o8 <- aggregate(dren_o8, by=list(dren_o8[,1]),FUN="min")
nSeg_ordem8 <- nrow(dren_o8)
dren_o9 <- dren_o9*stream2
dren_o9 <- data.frame(as.data.frame(dren_o9),as.data.frame(dren_o9))
dren_o9 <- aggregate(dren_o9, by=list(dren_o9[,1]),FUN="min")
nSeg_ordem9 <- nrow(dren_o9)
#Armazenando os valores na planilha
Result <-
c(infile,nSeg_ordem1,nSeg_ordem2,nSeg_ordem3,nSeg_ordem4,nSeg_ordem5,nSeg_orde
m6,nSeg_ordem7,nSeg_ordem8,nSeg_ordem9)
data_info <- rbind(data_info,Result)
counter =counter+1
}
#Salvando a planilha
write.table(data_info,file="nSegBom.csv",col.names= TRUE, row.names=FALSE,
sep=";",dec = ",")

```

### CÓDIGO A13: Área média das sub-microbacias de primeira ordem de cada microbacia

**Principais funções:** reclassify e aggregate

**Entrada:** Fluxo acumulado, drenagem com identificação dos canais e drenagens de cada microbacia classificada pelo método de Strahler

**Saída:** Planilha com os valores calculados para cada microbacia

```

#Bibliotecas do R
library("raster")
library("maptools")
library("rgdal")
library("rgeos")
setwd("I:/BD/Topo")
acc <- raster("tf_acc.tif")
id <- raster("tf_stream.tif")
m <- c(0, 1.1, 1, 1.9, 10, NA)
o1 <- matrix(m, ncol=3, byrow=TRUE)
#Diretório com as drenagens em shapefile classificada pelo método de Strahler
setwd("I:/BD/Rios2/Strahler")
#Função
maxN <- function(x, N=2){
len <- length(x)
if(N>len){
warning('N greater than length(x). Setting N=length(x)')
N <- length(x)
}
sort(x,partial=len-N+1)[len-N+1]
}

```

```

}
#Planilha com o nome das variáveis nas colunas
titulo <- c("Bacia","AreaM_ol","AreaMd_ol")
data_info <- rbind(c(NA,NA,NA),c(NA,NA,NA))
colnames(data_info) <- titulo
#Loop para processar todas os arquivos
file.list <- dir(pattern = ".tif")
file.number <- 477
counter = 1
for(i in 1:file.number) {
infile <- file.list[counter]
#Redefinindo o diretório
setwd("I:/BD/Rios2/Strahler")
rios <- raster(infile)
dren_ol <- reclassify(rios, 01)
id_bacia <- dren_ol*id
acc_bacia <- dren_ol*acc
data <- data.frame(as.data.frame(id_bacia), as.data.frame(acc_bacia))
data <- data[order(data[,1],na.last=NA),]
data_max <- aggregate(data, by=list(data[,1]), FUN=maxN)
t_md <- (median(data_max[,3]))*7931.503
t_m <- (mean(data_max[,3]))*7931.503
data_info1 <- c(infile, t_m, t_md)
data_info <- rbind(data_info,data_info1)
counter = counter+1
}
#Salvando a planilha com as variáveis
write.table(data_info,file="AreaMediaO1.csv",col.names= TRUE, row.names=FALSE,
sep=";",dec = ",")

```

**CÓDIGO A14:** Cálculo de diversas variáveis de microbacias a partir do MDE e da declividade

**Principais funções:** *quantile* e *mean*

**Entrada:** MDE, declividade e limite das microbacias

**Saída:** Planilha com os valores calculados para cada microbacia

**Observações:** Uma descrição das variáveis estão na Tabela 4.1 e 4.2

```

#Variáveis: minE,mE,mdE,maxE,
sdE,cvE,cE,Rl,mH,sdH,cvH,minSl,maxSl,mSl,sdSl,cvSl,cSl,f14Sl,f4Sl,f10Sl,Hyp,ER,Hyp
1,Hyp2,Hyp3,Pd,OC
#Bibliotecas do R
library(raster)
#Diretório com MDE e declividade de toda a área
setwd("I:/BD/Topo")
mde <- raster("mde.tif")
decl <- raster("declividade.tif")
#Transformação da declividade
decl <- (atan(decl/100))*180/pi
#Diretório das microbacias em formato raster
setwd("I:/BD/Bacias2/tiff")
#Planilha com o nome das variáveis nas colunas
Titulos <- c("Bacia","area","minE","mE","mdE","maxE",
"sdE","cvE","cE","Rl","mH","sdH","cvH","minSl","maxSl","mSl","sdSl","cvSl","cSl","f14
Sl","f4Sl","f10Sl","Hyp","ER","Hyp1","Hyp2","Hyp3","Pd","OC")
b_mb <- c(NA)

```

```

b_mb <- rbind(b_mb,b_mb)
colnames(b_mb) <- Titulos
#Loop para processar todas as microbacias
file.list <- dir(pattern = ".tif")
file.number <- 477
counter = 1
for(i in 1:file.number) {
infile <- file.list[counter]
bacia <- raster(infile)
bacia <- (bacia*0)+1
e <- extent(bacia)
#Recorte para limitar a área do mde e da declividade a área da bacia
decl2 <- crop(decl,e)
mde2 <- crop(mde,e)
#Área
area <- as.vector(bacia)
area <- sort(area,na.last=NA)
area <- sum(area)
#MDE da bacia
bacia_mde_r <- bacia*mde2
bacia_mde_t <- as.vector(bacia_mde_r)
bacia_mde_t <- sort(bacia_mde_t,na.last=NA)
##### Elevação
mE <- mean(bacia_mde_t)
sdE <- sd(bacia_mde_t)
cvE <- sdE/mE
minE <- min(bacia_mde_t)
mdE <- median(bacia_mde_t)
maxE <- max(bacia_mde_t)
Q1 <- quantile(bacia_mde_t, p=0.25, type = 1,na.rm=TRUE)
Q3 <- quantile(bacia_mde_t, p=0.75, type = 1,na.rm=TRUE)
D9 <- quantile(bacia_mde_t, p=0.9, type = 1,na.rm=TRUE)
D1 <- quantile(bacia_mde_t, p=0.1, type = 1,na.rm=TRUE)
cE <- as.numeric((Q3-Q1)/(2*D9-2*D1))
#Altura da bacia de drenagem
Alt_b <- bacia_mde_t-minE
mH <- mean(Alt_b)
sdH <- sd(Alt_b)
cvH <- sdH/mH
#Amplitude da bacia de drenagem
max_b <- max(bacia_mde_t)
Rl <- max_b-minE
#Declividade
decl_b <- bacia*decl2
decl_b <- as.vector(decl_b)
decl_b <- sort(decl_b,na.last=NA)
minSl <- min(decl_b)
maxSl <- max(decl_b)
#Frações de declividade menor que 4, 7 e 10 GRAUS
f14Sl <- ((length(decl_b[decl_b <= 4]))/length(decl_b))*100
p_decl7 <- ((length(decl_b[decl_b <= 7]))/length(decl_b))*100
f10Sl <- ((length(decl_b[decl_b <= 10]))/length(decl_b))*100
mSl <- mean(decl_b)
sdSl <- sd(decl_b)
#Coeficiente de variação
cvSl <- sdSl/mSl
#Quantis
Q1 <- quantile(decl_b, p=0.25, type = 1,na.rm=TRUE)

```

```

Q3 <- quantile(decl_b, p=0.75, type = 1,na.rm=TRUE)
D9 <- quantile(decl_b, p=0.9, type = 1,na.rm=TRUE)
D1 <- quantile(decl_b, p=0.1, type = 1,na.rm=TRUE)
#Índice percentílico de curtose
cS1 <- as.numeric((Q3-Q1)/(2*D9-2*D1))
#Integral hipsométrica (Aproximação)
b_min <- min(bacia_mde_t)
b_max <- max(bacia_mde_t)
b_media <- mean(bacia_mde_t)
q1 <- function(x){
  y <- quantile(x, p=0.1, type = 1,na.rm=TRUE)
  y<- as.numeric(y)
  return(y)
}
b_q1 <- q1(bacia_mde_t)
q2 <- function(x){
  y <- quantile(x, p=0.2, type = 1,na.rm=TRUE)
  y<- as.numeric(y)
  return(y)
}
b_q2 <- q2(bacia_mde_t)
q3 <- function(x){
  y <- quantile(x, p=0.3, type = 1,na.rm=TRUE)
  y<- as.numeric(y)
  return(y)
}
b_q3 <- q3(bacia_mde_t)
q4 <- function(x){
  y <- quantile(x, p=0.4, type = 1,na.rm=TRUE)
  y<- as.numeric(y)
  return(y)
}
b_q4 <- q4(bacia_mde_t)
q5 <- function(x){
  y <- quantile(x, p=0.5, type = 1,na.rm=TRUE)
  y<- as.numeric(y)
  return(y)
}
b_q5 <- q5(bacia_mde_t)
q6 <- function(x){
  y <- quantile(x, p=0.6, type = 1,na.rm=TRUE)
  y<- as.numeric(y)
  return(y)
}
b_q6 <- q6(bacia_mde_t)
q7 <- function(x){
  y <- quantile(x, p=0.7, type = 1,na.rm=TRUE)
  y<- as.numeric(y)
  return(y)
}
b_q7 <- q7(bacia_mde_t)
q8 <- function(x){
  y <- quantile(x, p=0.8, type = 1,na.rm=TRUE)
  y<- as.numeric(y)
  return(y)
}
b_q8 <- q8(bacia_mde_t)
q9 <- function(x){

```

```

y <- quantile(x, p=0.9, type = 1,na.rm=TRUE)
y<- as.numeric(y)
return(y)
}
b_q9 <- q9(bacia_mde_t)
b_qs <- c(1,b_min,b_q1,b_q2,b_q3,b_q4,b_q5,b_q6,b_q7,b_q8,b_q9,b_max)
b_qs[3] <- b_qs[3]*(1/(b_qs[12]-b_qs[2]))+(1-(b_qs[12]/(b_qs[12]-b_qs[2])))
b_qs[4] <- b_qs[4]*(1/(b_qs[12]-b_qs[2]))+(1-(b_qs[12]/(b_qs[12]-b_qs[2])))
b_qs[5] <- b_qs[5]*(1/(b_qs[12]-b_qs[2]))+(1-(b_qs[12]/(b_qs[12]-b_qs[2])))
b_qs[6] <- b_qs[6]*(1/(b_qs[12]-b_qs[2]))+(1-(b_qs[12]/(b_qs[12]-b_qs[2])))
b_qs[7] <- b_qs[7]*(1/(b_qs[12]-b_qs[2]))+(1-(b_qs[12]/(b_qs[12]-b_qs[2])))
b_qs[8] <- b_qs[8]*(1/(b_qs[12]-b_qs[2]))+(1-(b_qs[12]/(b_qs[12]-b_qs[2])))
b_qs[9] <- b_qs[9]*(1/(b_qs[12]-b_qs[2]))+(1-(b_qs[12]/(b_qs[12]-b_qs[2])))
b_qs[10] <- b_qs[10]*(1/(b_qs[12]-b_qs[2]))+(1-(b_qs[12]/(b_qs[12]-b_qs[2])))
b_qs[11] <- b_qs[11]*(1/(b_qs[12]-b_qs[2]))+(1-(b_qs[12]/(b_qs[12]-b_qs[2])))
b_qs[12] <- b_qs[12]*(1/(b_qs[12]-b_qs[2]))+(1-(b_qs[12]/(b_qs[12]-b_qs[2])))
b_qs[2] <- 0
b_qs[12] <- 1
Hyp1 <- ((b_qs[10]+b_qs[9])/2)-((b_qs[5]+b_qs[4])/2)
Hyp <-
(b_qs[3]+b_qs[4]+b_qs[5]+b_qs[6]+b_qs[7]+b_qs[8]+b_qs[9]+b_qs[10]+b_qs[11])/9
Hyp2 <- Hyp1/areakm
Hyp3 <-
((b_qs[8]+b_qs[9]+b_qs[10]+b_qs[11]))/(b_qs[3]+b_qs[4]+b_qs[5]+b_qs[6]+b_qs[7]+b_qs[8]+b_qs[9]+b_qs[10]+b_qs[11])
#Índice Elevação-Relevo
ER <- (b_media-b_min)/(b_max-b_min)
#Coeficiente orográfico: Altura media*coeficiente de massividade
OC <- ER*(b_media-b_min)
#####Predominância
Pd <- (b_media)-(b_min+b_max)/2
#Armazenamento das variáveis na planilha
b_mb1 <- c(infile,area,minE,mE,mdE,maxE,
sdE,cvE,cE,Rl,mH,sdH,cvH,minSl,maxSl,mSl,sdSl,cvSl,cSl,f14Sl,f4Sl,f10Sl,Hyp,ER,Hyp
1,Hyp2,Hyp3,Pd,OC)
b_mb <- rbind(b_mb,b_mb1)
counter = counter+1
}
#Planilha com as informações
write.table(b_mb,file="Bacia_Elev_Decl.csv",col.names= TRUE, row.names=FALSE,
sep=";",dec = ",")

```

## CÓDIGO A15: Definição dos centroides das microbacias

**Principais funções:** *median*

**Entrada:** MDE, declividade e limite das microbacias

**Saída:** Planilha com os valores calculados para cada microbacia

**Observações:** Uma descrição das variáveis estão na Tabela 4.1 e 4.2

```

#Bibliotecas do R
library("raster")
#Planilha a ser preenchida com o ID e coordenadas dos centroides a serem calculados
titulo <- c("File_name","x_center","y_center")
data_info <- rbind(c(NA,NA,NA),c(NA,NA,NA))
colnames(data_info) <- titulo

```

```

#Diretório com o limite das microbacias em formato raster
setwd("I:/BD/Bacias2/tiff")
#Loop para processamento de todas as microbacias
file.list <- dir(pattern = ".tif")
file.number <- 477
counter = 1
for(i in 1:file.number) {
infile <- file.list[counter]
bacia <- raster(infile)
bacia <- as.data.frame(bacia, xy=TRUE)
bacia <- bacia[order(bacia[,3],na.last=NA),]
x_md <- median(bacia[,1])
y_md <- median(bacia[,2])
#Armazenamento na planilha
Result <- c(infile,x_md,y_md)
data_info <- rbind(data_info,Result)
counter =counter+1
}
#Salvando a planilha
write.table(data_info,file="xycenter.csv",col.names= TRUE, row.names=FALSE,
sep=";",dec = ",")

```

