

**Universidade Federal de Minas Gerais
Instituto de Geociências
Programa de Pós-graduação em Análise e Modelagem de
Sistemas Ambientais**

Luis Felipe Soares Cherem

**Análise Morfométrica da Bacia do Alto Rio das
Velhas – MG**

**Belo Horizonte
2008**

Luis Felipe Soares Cherem

Análise morfométrica da bacia do alto Rio das Velhas – MG

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientador: Antônio Pereira Magalhães Junior

Co-orientador: Sergio Donizete Faria

Belo Horizonte
Instituto de Geociências da UFMG

2008

C521a
2008

Cherem, Luis Felipe Soares.

Análise morfométrica da Bacia do Alto do Rio das Velhas – MG [manuscrito] / Luís Felipe Soares Cherem. – 2008.

xii, 110 f. : il. mapas, tabs.; enc.

Orientador: Antônio Pereira Magalhães Júnior.

Co-orientador: Sérgio Donizete Faria.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2008.

Bibliografia: f. 86-96.

1. Geomorfologia – Minas Gerais – Teses. 2. Geologia – Métodos estatísticos – Teses. 3. Bacia do Alto do Rio das Velhas (MG) – Teses. I. Magalhães Júnior, Antônio Pereira. II. Faria, Sérgio Donizete III. Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, Departamento de Cartografia. IV. Título.

CDU: 551.4(815.1):519.2:55

Aprovada pela Banca Examinadora em cumprimento a requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais**.

Dr. Antônio Pereira Magalhães Júnior

Orientador
IGC-UFMG, BH

Dr. Sergio Donizete Faria

Co-orientador
IGC-UFMG, BH

Dra. Ana Clara Mourão Moura

Membro da Banca - convidada
IGC-UFMG, BH

Dr. André Augusto Rodrigues Salgado

Membro da Banca - convidado
IGC-UFMG, BH

Candidato:

Belo Horizonte, 14 de outubro de 2008.

“A experiência mostra que, prevendo com bastante antecedência os passos a serem dados, é possível agir rapidamente na hora de executá-los.”

Cardeal Richelieu (1585-1642)

Dedico essa pesquisa a todos que despertaram meu interesse pela Geomorfologia, ajudaram a me aproximar dessa ciência ou, de alguma forma, farão uso dos resultados e discussões apresentados nessa dissertação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que participaram de meu cotidiano nesses dezoito meses de mestrado, independente da frequência e intensidade do convívio, não posso dizer que não haja um pouquinho de cada um em alguma dessas páginas. Agradeço, nesse aspecto, aos meus professores, que conscientemente me apresentaram novos caminhos. Desses professores, agradeço em especial ao professor Antônio Magalhães Jr. pela orientação acadêmica e amizade, agora de longa data. Sou grato pela incondicional confiança e inestimáveis oportunidades que têm sido indispensáveis no meu aprimoramento intelectual e moral. Agradeço também aos professores Segio Faria e André Salgado pela amizade e co-orientação em minha pesquisa de mestrado e em outras pesquisas desenvolvidas nos últimos dezoito meses.

Agradeço a minha estimada e tão querida família: aos meus pais que, como *marchands*, colocaram sua fé em minha capacidade, como tutores, souberam – e ainda sabem – fazer valer aquilo que muitos chamam de autoridade, mas que tenho como a mais fina educação fundada em suas vivências e os agradeço por serem fidedignos ao que, para mim, se espera dos pais: amor e atenção. Agradeço a meu irmão e minha irmã que, com suas características personalidades, se farão inesquecíveis para mim e que, garantidamente, serão presenças constantes. Agradeço também aos colegas que se tornaram amigos, aos amigos hoje colegas e aos amigos de sempre, pessoas sem as quais o descanso seria um tanto solitário.

Por fim, agradeço a Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de mestrado nos últimos dezessete meses.

RESUMO

A Geomorfologia Regional de Minas Gerais é estudada por geomorfólogos e geólogos desde o início do século XX, quando pesquisadores estrangeiros realizaram as primeiras pesquisas no estado. Durante esse período, o surgimento de novos conceitos e metodologias na Geomorfologia ocasionou a mudança de teorias de evolução do relevo dessa região. Essas perspectivas são conseqüências da interdisciplinaridade entre ciências de diferentes áreas de conhecimento, com é o caso da recente aplicação de modelos digitais de elevação (MDE) do terreno como base para realização de análises de sistemas geomorfológicos de escala regional e local. Os MDEs têm sido usados em modelos de análise morfológica, de processos e de dinâmica evolutiva, na literatura nacional e internacional. Um dos tipos de estudos realizados é a análise morfológica de bacias hidrográficas ou análise morfométrica de bacias, na qual o objetivo é caracterizar os aspectos geométricos e de composição dessas bacias, estabelecendo indicadores relacionados à forma, ao arranjo estrutural e à composição integrativa entre os elementos.. Nesse contexto, essa dissertação compartimenta a bacia do alto Rio das Velhas, aplicando parâmetros morfométricos. Para tanto, a pesquisa é estruturada em três etapas metodológicas principais: 1) geração de MDE e de rede hidrográfica compatíveis à escala de análise; 2) extração dos parâmetros morfométricos; 3) análise morfométrica. Na primeira etapa, em especial, é testada a capacidade de MDEs e da rede de drenagem derivada deles em representar o relevo e a drenagem com consistência hidrológica e morfológica. Os resultados indicam que as redes de drenagem gerada a partir dos MDEs não apresentam consistência morfológica nos canais de baixa ordem hierárquica, devendo, na escala 1:50.000, ser utilizada a base cartográfica e demonstram que a bacia do alto Rio das Velhas pode ser dividida em quatro compartimentos morfométricos.

Palavras-chave: análise morfométrica, geoestatística aplicada, MDE, bacia do alto Rio das Velhas.

ABSTRACT

The Regional Geomorphology of Minas Gerais has been studied by geomorphologists and geologists since the early 1900's, when foreign surveys were carried out in this Brazil State. During this time, the application of new conceptual and methodological perspectives on Geomorphology has modified theories of relief evolution. These perspectives are consequences of the interdisciplinarity among sciences of different areas, as the example of the usage of digital elevation models (DEM), which are applied on geomorphologic systems analyses in regional and local scale. The DEMs are used in morphologic analysis models, processes development ones and evolution dynamics ones by national and international literature. Watershed morphologic analysis, or morphometric analysis, is one of the most cited kinds of studies and its objective is to characterize geometric aspects and composition of these areas, establishing indicators which are correlated to form, structural arrangement and integrative composition of its elements. So, the aimed objective is to cluster its morphology, by morphometric parameters. For that, the study is structured around three main stages: 1) generation of compatible DEM and drainage net; 2) extraction of the morphometric parameters; and 3) morphometric analysis. In particular, the first stage also access MDEs potential of representing the relief and the drainage under the laws of hydrology and morphology consistency. Results demonstrate the lack of morphological consistency for the drainage nets created from the DEMs, especially for low order rivers, in spite of it; they indicate that cartographic chart data are preferred, as 1:50.000 charts. Results also evidence four-group morphometric compartments in the upper das Velhas River watershed.

Key-words: morphometric analysis, applied geostatistic, DEM, upper das Velhas River watershed.

SUMÁRIO

1 Introdução	1
1.1 Objetivo geral e específicos	7
2 Modelos digitais de elevação e redes de drenagem morfológica e hidrologicamente consistentes	9
2.1 Modelos Digitais de Elevação	9
2.2 Dados Vetoriais Consistentes para a Rede de Drenagem	19
3 Análise morfométrica de bacias hidrográficas	23
3.1 Parâmetros Morfométricos para Análise de Bacias Hidrográficas	26
3.1.1 Classe Linear	26
3.1.2 Classe Zonal	30
3.1.3 Classe Hipsométrica	32
3.2 Análise Morfométrica Individual e Comparativa de Bacias Hidrográficas	34
4 Caracterização da Área de Estudo	37
5 Metodologia	41
5.1 Geração do Modelo Digital de Elevação e das Redes Hidrográficas Morfológica e Hidrologicamente Consistentes	44
5.1.1 Seleção da Unidade Básica de Análise	44
5.1.2 Geração de MDE Morfológica e Hidrologicamente Consistentes	45
5.1.3 Geração das Redes Hidrográficas com Consistência Hidrológica e Morfológica	45
5.1.4 Delimitação das Sub-Bacias para Extração dos Parâmetros Morfométricos	46
5.2 Análise Morfométrica da Bacia do Alto Rio das Velhas	48
5.2.1 Definição dos Parâmetros Morfométricos	48
5.2.2 Extração dos Parâmetros Morfométricos das Sub-Bacias de Quinta Ordem Hierárquica	49
5.2.3 Preparação da Base de Dados	49
5.2.4 Correlação das Sub-Bacias de Quinta Ordem que Integram a Bacia do Alto Rio das Velhas	50
6 Análise da consistência morfológica e hidrológica dos modelos digitais de elevação e redes de drenagens gerados para a bacia do alto rio das velhas	51
6.1 Krigagem do MDE-SRTM para a Bacia do Alto Rio das Velhas: Avaliação Morfológica e Hidrológica	51
6.2 Comparação da Rede de Drenagem Extraída de MDE-original, MDE-krigado e de Base Cartográfica do IBGE: Avaliação para Uso em Análise Morfométrica de Bacias Hidrográfica	57
7 Análise morfométrica da bacia hidrográfica do alto Rio das Velhas	72

7.1 Análise Individual da Bacia do Alto Rio das Velhas	72
7.2 Análise Comparativa das Sub-Bacias de Quinta Ordem da Bacia do Alto Rio das Velhas	74
7.3 Compartimentação Morfométrica da Bacia do Alto Rio das Velhas	81
8 Considerações Finais	84
9 Referências Bibliográficas	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Diferença de elevação entre DEM-SRTM e DEM-TOPO: (a) em metros; (b) em porcentagem.	12
Figura 2.2 - Morfologia atenuada pela transformação inversa de Fourier: (a) Morro de São José/RJ no MDE-SRTM original; (b) Morro de São José no MDE corrigido; (c) relevo movimentado no MDE-SRTM original; (d) relevo movimentado no MDE corrigido.	13
Figura 2.3 – Histograma de altitude e declividade obtido sobre MDE gerado para a mesma área a partir de dados de cartas topográficas e interpolados.	14
Figura 2.4 - Comparação de MDEs em perspectiva tridimensional para a bacia do rio Maracujá, região Central de Minas Gerais: (a) MDEs-SRTM original (90m); (b) MDE-SRTM interpolado por krigagem (30m).	15
Figura 2.5 - Vazão simulada para uma bacia em três MDE diferentes, considerando um único evento de chuva e infiltração constante de 5mm/h.	16
Figura 2.6 – Variograma e seus componentes.	17
Figura 2.7 – Derivação da declividade de MDE-SRTM: (a) original e (b) krigado.	18
Figura 2.8 – Rede de drenagem com diferentes limiares sobreposta ao MDE.	21
Figura 2.9 – Composição digital da rede de drenagem, variação de escala e nível de detalhe: (a) malha vetorial Geominas (1:50.000); (b) malha matricial extraída de MDE/SRTM (90m); (c) malha vetorial derivada de B.	22
Figura 3.1 – Representação gráfica das Leis de Horton para a bacia do alto Rio das Velhas.	25
Figura 3.2 – Hierarquia fluvial definida por (a) Strahler (1952) e (b) Horton (1945).	27
Figura 3.3 – Magnitude fluvial definida por (a) Scheidegger (1965) e (b) Shreve (1966).	28
Figura 3.4 – Integral hipsométrica da bacia do Rio Uberabinha: AC - a curva hipsométrica e ABC - a integral hipsométrica.	33
Figura 3.5 – Grupamento das bacias hidrográficas do Planalto de Poços de Caldas, Estado de Minas Gerais, dado pelo coeficiente de correlação de Spearman.	34
Figura 3.6 – Compartimentação geomorfológica da bacia do Rio Uberabinha, MG.	36
Figura 4.1 – Localização da área de estudo em escala nacional e estadual.	37
Figura 4.2 – Localização da área de estudo com detalhes da rede viária.	38

Figura 4.3 – Características físicas da bacia do alto Rio das Velhas: (a) litotípos; (b) classificação altimétrica.	39
Figura 4.4 – Corte longitudinal W-E do Quadrilátero Ferrífero, representando seu relevo e unidades litoestratigráficas.	40
Figura 5.1 – Bacias exorréicas do sudeste da África, classificadas segundo o nível de base (Oceano Índico) e não segundo a ordem de grandeza.	47
Figura 6.1 – Variograma gerado para a krigagem ordinária gaussiana do MDE-SRTM da bacia do alto Rio das Velhas.	52
Figura 6.2 – Comparação altimétrica entre o MDE-SRTM: (a) original (90m); (b) gerado por krigagem (30m) para a bacia hidrográfica do alto Rio das Velhas.	53
Figura 6.3 – Comparação dos aspectos do relevo no divisor de águas entre o Ribeirão do Silva e Ribeirão Carioca para os MDEs-SRTM: (a) original; (b) krigado (SW da bacia do alto Rio das Velhas).	54
Figura 6.4 – Comparação da inconsistência hidrológica entre: (a) MDE-original e (b) MDE-krigado.	55
Figura 6.5 – Curvas hipsométricas do relevo da bacia do alto Rio das Velhas gerado para o MDE-original (linha azul) e MDE-krigado (linha tracejada vermelha).	56
Figura 6.6 – Comparação da inconsistência hidrológica em áreas de corpos d'água na Serra da Moeda: (a) MDE-original, (b) MDE-krigado.	61
Figura 6.7 – Conflito topológico nos trechos da rede de drenagem de cavas, borda W da Sinclinal Moeda, destaque para a diferença no arranjo da rede de drenagem gerada a partir de (a) MDE-original e (b) folha topográfica – 1:50.000.	62
Figura 6.8 – Comparação da sinuosidade dos canais da bacia do Rio das Velhas: rede de drenagem extraída de (a) carta topográfica do IBGE em escala de 1:50.000; e (b) MDE-original.	63
Figura 6.9 – Canais de primeira ordem gerados erroneamente ao longo de canais com largura superior a resolução do MDE-krigado (30 metros): acúmulo de canais alinhados ao longo do vale do médio curso do rio das Velhas.	64
Figura 6.10 – Comparação das redes de drenagem geradas a partir de (a) MDE-original, (b) MDE-krigado, (c) extraída de carta topográfica em escala de 1:50.000.	66

Figura 6.11 – Gráficos comparativos dos valores de (a) Rb, (b) Lm, (c) Rlm e (d) RA para as redes de drenagem geradas a partir de MDE-original, cartas topográficas e MDE-krigado.	67
Figura 6.12 – Índice de sinuosidade médio por ordem hierárquica gerados para as redes de drenagem analisadas.	69
Figura 6.13 – Índice de circularidade (I_c) gerado para a bacia do alto Rio das Velhas nas três bases de dados analisadas.	69
Figura 6.14 – Comparação do perímetro e da área de micro-bacia do alto Ribeirão Carioca gerada automática-mente em (a) MDE-original; (b) MDE-krigado	70
Figura 6.15 – Densidade de drenagem (km/km^2) calculada por ordem e total para a bacia do alto Rio das Velhas.	71
Figura 6.16 – Densidade de rios (rio/km^2) calculada por ordem e total para a bacia do alto Rio das Velhas.	71
Figura 7.1 – Retas de regressão linear do logaritmo dos parâmetros de Horton calculados para a bacia do alto Rio das Velhas	73
Figura 7.2 – Significância média dos parâmetros que representam as leis de Horton (1945) para as bacias de quinta ordem que integram a bacia do alto Rio das Velhas.	75
Figura 7.3 – Significância dos parâmetros que representam as leis de Horton (1945) para as bacias de quinta ordem que integram a bacia do alto Rio das Velhas.	76
Figura 7.4 – Classificação das sub-bacias de quinta ordem para a (a) Densidade de drenagem, (b) Densidade hidrográfica, (c) Índice de circularidade e (d) Índice de rugosidade – agrupamentos definidos por quebra natural.	78
Figura 7.5 – Mapas de (a) sinuosidade média, (b) declividade média dos canais de quarta ordem e ordens superiores e (c) declividade média e máxima das bacias de quinta ordem hierárquica que integram a bacia do alto Rio das Velhas.	80
Figura 7.6 – Compartimentação morfométrica da bacia do Alto Rio das Velhas	82
Figura 7.7 – Comparação dos parâmetros morfométricos gerados os compartimentos morfométricos que drenam o Complexo do Bação: (a) densidade de drenagem; (b) densidade hidrográfica, (c) índice de rugosidade, (d) declividade média das vertentes.	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 – Representação da perda de área em áreas de topo e vale pela interpolação do MDE-SRTM para a bacia do alto Rio das Velhas	57
Tabela 7.1 – Parâmetros que representam as leis de Horton calculados para a bacia do alto Rio das Velhas	73
Tabela 7.2 – Parâmetros calculados para a bacia do alto Rio das Velhas	77
Tabela 7.3 – Índice de sinuosidade média de canal (I_s) por valor médio de ordem	79

1 INTRODUÇÃO

A análise e a modelagem de sistemas ambientais estão inseridas em um contexto científico que advém da visão quantitativa das ciências ambientais. Essa abordagem tem como um de seus marcos teóricos a Ciência da Paisagem de Dokoutchaev, pesquisador russo do século XIX. O objeto de estudo dessa ciência, um sistema ambiental, foi definido por esse pesquisador com sendo um complexo natural territorial e a interação de seus componentes bióticos e abióticos que se desenvolvem em interior (CAVALCANTI e RODRIGUEZ, 1997).

Ao longo do século XX, esse conceito de sistema foi sendo apropriado e aprimorado pelas ciências oriundas das Ciências Naturais. À medida que essas ciências foram se aprimorando teórica e metodologicamente, diversas classificações e tipologias de sistemas foram criadas, o que favoreceu a constituição de diversas ciências ambientais – como a Geomorfologia, a Climatologia, a Hidrologia e a Ecologia. Em especial, na Geomorfologia, o conceito de sistema foi pioneiramente utilizado por Chorley (1962) e, desde então, novos desdobramentos teóricos têm sido alcançados (CHORLEY e KENNEDY, 1971; WOLDENBERG, 1985; CHRISTOFOLETTI, 1999). Assim como a renovação conceitual, a reformulação metodológica é constante, sendo subsidiada por novas tecnologias de mensuração e análise.

A evolução dos métodos científicos de mensuração e análise é orientada pela necessidade de que resultados mais precisos sejam obtidos na busca do melhor entendimento dos sistemas ambientais. Entretanto, esta evolução não se edifica apenas sobre si mesma, mas depende também da transformação cognitiva do objeto de estudo para se estabelecer sobre novos pilares, pois, enquanto ele é estudado, novos aspectos são observados, ocasionando novas perspectivas e possibilidades de pesquisas. Assim, quando esse objeto é estudado novamente, o estudo se respalda em um corpo teórico-metodológico mais robusto.

Além da superação conceitual e metodológica interna a cada ciência, a constante apropriação de conceitos e métodos científicos entre ciências de diferentes áreas do conhecimento possibilita também um intercâmbio teórico e metodológico entre elas. Essa afirmação é mais tangível quando demonstrada por meio de exemplos. Assim, podemos citar o exemplo das Geociências auxiliadas pela Estatística e pela Ciência da Computação.

Dentro das Geociências, a Geomorfologia surgiu enquanto uma ciência empirista, isto é, se firmava em observações de campo para, a partir delas, propor suas leis gerais. Além dessas observações, cartas topográficas e mapas geológicos eram já de grande valor, pois o cruzamento de informações presentes nesses materiais cartográficos auxiliava na validação científica das observações de campo. Nessa fase, se pode dizer que a Geomorfologia passava por um momento dedutivista, fundado em observações qualitativas.

Na década de 1980, o desenvolvimento do sensoriamento remoto do relevo por radares interferométricos e a criação e implementação de ferramentas computacionais com interface mais amigável aos usuários, associado a um novo momento científico das Geociências, conceitual e tecnicamente renovado, possibilitou o uso de técnicas de mensuração “à distância”. Essas técnicas contribuíram para o desenvolvimento de ferramentas computacionais para o tratamento da informação geográfica, os chamados Sistemas de Informação Geográfica – SIG. Isso, conseqüentemente, foi consolidado por estudos de caráter científico realizados pela Geologia, Geografia, Geomorfologia, Economia, Ciências Atuariais, Estatística, Epidemiologia, dentre outras, em pesquisas desenvolvidas nos setores público e privado para planejamento e gestão territorial de suas atividades.

Desde então, a Geomorfologia passa a ser marcada pelo uso de técnicas quantitativas, conforme pode ser observado em estudos recentes (TUCKER et al., 2001; GANAS et al., 2005; DRÂGUF e BLASCHKE, 2006; SCHOONOVER et al., 2007; SALGADO et al. 2008a). Cabe ressaltar que o tratamento de grande quantidade de dados e a complexidade metodológica em determinadas análises não seriam possíveis sem as ferramentas fornecidas pela Ciência da Computação e também pela Estatística Espacial. Mas independente da renovação conceitual e metodológica, o objetivo geral permanece o mesmo: estudar e interpretar as formas do relevo terrestre e os mecanismos responsáveis pela sua modelagem, em todas as suas escalas de análise, desde modelos de escala global (WALCOTT e SUMMERFIELD, 2007), até modelos locais (PARANHOS FILHO et al., 2003).

A análise e modelagem de sistemas geomorfológicos em ambiente computacional potencializaram a obtenção e análise de dados e informação que antes demandavam dispendiosos e longos levantamentos de campo e gabinete, como é o caso da análise

morfológica de bacias hidrográficas. Essa análise é um dos tipos de análise morfológica e tem como objetivo quantificar atributos do relevo para classificá-lo e comparar o modelado e a evolução em áreas de contexto climático (exógeno) e estrutural (endógeno) diferentes (HORTON, 1945; STRAHLER, 1954; SCHUMM, 1956; STRAHLER, 1957; STRAHLER, 1958; CHTRITOFOLLETTI, 1970; FELTRAN FILHO, 1982; MAIO, 1990; WALCOTT E SUMMERFIELD, 2007).

Uma das tecnologias utilizadas na análise de sistemas geomorfológicos é o tratamento computacional de dados obtidos por sensoriamento remoto, principalmente com dados topográficos fornecidos por radares interferométricos, a exemplo daqueles provenientes da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*, na sigla em inglês), missão realizada em 2000 pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*, na sigla em inglês). Esses dados objetivam gerar um modelo topográfico para toda a superfície terrestre em resolução espacial mais alta do que a anterior GTOPO30 (*Global Topography*, na sigla em inglês), que corresponde a um banco de dados topográficos compilado pelo USGS (*United States Geological Survey*, na sigla em inglês) de diversas fontes.

Os dados topográficos obtidos por meio de sensoriamento remoto podem servir de base para estudos em diversas unidades de análise geomorfológica (sistemas geomorfológicos), tais como: bacia hidrográfica, complexo serrano (Quadrilátero Ferrífero – SALGADO et al., 2008b), cadeia de montanhas (Rochosas Canadenses – SAUCHYN et al., 1998) e ilha (Macronésia – SCHEIDEGGER, 2002). Cada sistema pode ser analisado em recortes escalares diferentes. Como exemplo podem ser citadas as bacias hidrográficas, em escalas desde micro-bacias (VALERIANO, 2002) até grupos de bacias de grande porte (WALCOTT e SUMMERFIELD, 2007; COELHO NETO, 2007). E a diversidade não é apenas relativa às características geográficas das áreas de estudos, os objetivos dos estudos também variam desde aqueles que se restringem à classificação do relevo (VALERIANO 2003; TOLLEDO et al., 2006; VESTENA et al., 2006) até estudos que buscam correlacionar áreas com feições homogêneas a processos tectônicos (SALCHYN et al., 1998; SZÉKELY e KARÁTSON, 2004; RUSZKICZAY-RUDIGER, 2007), ou à dinâmica hidrológica (COSTA-CABRAL e BURGESS, 1997; VICENS e MARQUES, 2006), ou mesmo estudos que visam testar métodos de classificação do relevo em ambiente digital e

melhorar a qualidade dos dados topográficos (HOTT e FURTADO, 2004; DRÂGUF e BLASCHE, 2006, VALERIANO, 2002).

Observa-se nos últimos anos o constante aprimoramento dos SIGs com a inclusão de novas ferramentas, como os pacotes de tratamento geoestatístico e a implementação de redes espaciais, em função de demandas mais específicas (VALERIANO, 2002; SCHEIDEGGER, 2002; FLORENZANO, 2005; GUSTAVSSON et al., 2006; DRÂGUF e BLASCHKE, 2006; CHAUDHRY e MACKANESS, 2007). Assim, o ambiente virtual disponibilizado pela computação conferiu maior versatilidade no tratamento de banco de dados antes impossíveis de serem gerados e interpretados. Além disso, viabilizou a implementação de modelos estatísticos anteriormente pouco aplicáveis.

Esse fato pode ser observado nos estudos geomorfológicos que abordam a análise morfológica do relevo a partir de atributos morfológicos derivados em ambiente digital. A técnica mais comum de derivação de atributos morfológicos do relevo em ambiente digital é a partir do uso dos modelos digitais de elevação (MDEs) e da rede hidrográfica digital, os quais são obtidos por imageamento orbital ou pelo tratamento de cartas topográficas. Sobre esses dados são aplicadas rotinas computacionais para extrair os dados que compõem os parâmetros morfométricos. Para tanto, os MDEs e as redes hidrográficas devem ter consistência morfológica e hidrológica para que os resultados obtidos nas análises morfométricas sejam válidos.

No último decênio, essa potencialidade impulsionou pesquisas relacionadas à análise do relevo desenvolvidas no Brasil e em outros países. No cenário brasileiro em geral, os estudos realizados têm como objetivo mais a geração de dados morfométricos que a análise desses dados (MILANI e CANALI, 2000; ALCÂNTARA e AMORIM, 2005; RECKZEIEGEL e ROBAINA, 2006; RODRIGUES e BRITO, 2006; SUCUPIRA et al., 2006; VICENS, 2006; FELTRAN FILHO e LIMA, 2007). As pesquisas geomorfológicas que tratam da análise morfométrica a partir de estudos estatísticos são raras na produção científica nacional (POLITANO e PISSARRA, 2003; VICENS e MARQUES, 2006; SANTOS E SOBREIRA, 2008). Em contrapartida, o cenário internacional apresenta um número representativo de estudos que utilizam os dados morfométricos como objetos de estudo, não apenas como resultados (SILVEIRA, 2006; MOUSSA e BOCQUILON, 1996;

SAUCHYN et al., 1998; TUCKER et al., 2001; SCHIDEgger, 2002; SHANKAR et al., 2002; SZÉKELY e KARÁTSON, 2004).

Em especial, alguns estudos focados na análise morfométrica do relevo foram desenvolvidos em bacias hidrográficas do estado de Minas Gerais (CHRISTOFOLETTI, 1970; OLIVEIRA et al., 2007; LANA et al. 2001; ALVES e CASTRO, 2003; RODRIGUES e BRITO, 2000; TOLLEDO et al., 2006; FELTRAN FILHO e LIMA, 2007).

A análise morfológica de sistemas ambientais, em especial a análise morfométrica de bacias hidrográficas, é de extrema importância para o atual momento científico da Geomorfologia, já que, subsidiados por novas metodologias e métodos de obtenção e interpretação dos resultados, os estudos podem contribuir no entendimento do modelado escultural do relevo da bacia e contribuir metodologicamente para estudos futuros de maior escala de análise geográfica. Para que essa contribuição se confirme de fato, é necessário que os dados topográficos, sobre os quais são aplicadas as análises morfológicas, sejam precisos em representar a superfície terrestre na escala cartográfica adequada.

As bacias hidrográficas são sistemas ambientais cuja análise morfológica envolve a rede de drenagem e o relevo, permitindo interpretar “[...] a forma, o arranjo estrutural e a composição integrativa entre esses elementos [...]” (CHRISTOFOLLETTI, 1999, p. 52). Portanto, nessa escala de análise, as vertentes e cursos d’água são considerados atributos do relevo e da rede de drenagem, respectivamente.

Dentre os elementos analisados pela Geomorfologia podem ser citados redes de drenagem, vertentes, complexos litorâneos, canais e vales fluviais, bacias hidrográficas, complexos serranos, planícies e bacias sedimentares (CHRISTOFOLETTI, 1999). A escala geográfica dos sistemas analisados define as variáveis utilizadas para realizar os testes de correlação necessários. Como exemplo, a vazão, a largura e a profundidade do canal e a rugosidade do leito são variáveis indispensáveis na análise morfológica de canais fluviais. No entanto, são variáveis dispensáveis na análise morfológica de bacias hidrográficas, na qual variáveis como densidade de drenagem, relação de bifurcação, índice de dissecação e índice de rugosidade representam com maior precisão e correlação o quadro geomorfológico.

O uso de MDEs para representar o relevo e derivar a rede de drenagem foi ampliado desde a disponibilização de bancos de dados altimétricos obtidos por sensoriamento remoto, mais especificamente obtidos por imageamento via interferometria radiométrica (FLORENZANO, 2004). O banco de dados mais completo e mais utilizado são os MDEs gerados pela SRTM. Esse banco de dados matricial tem resolução espacial de 30 metros para o território dos Estados Unidos e 90 metros para o restante do globo. Valeriano (2004), Jarvis et al. (2004), Valeriano (2005), Hancock et al. (2006), Pinheiro (2006), Torres et al. (2006), Nikolakopoulos et al. (2006) e Duarte e Assad (2007) são exemplos dos diversos estudos que têm como objetivo avaliar a capacidade dos MDEs-SRTM em representar o relevo, isto é, avaliar a consistência morfológica e hidrológica dos MDE-SRTM na representação do relevo. Se por um lado esses trabalhos avaliam a consistência morfológica e hidrológica do relevo, por outro, não avaliam a capacidade desses MDEs em representar a rede de drenagem.

A discussão sobre a consistência morfológica da rede de drenagem derivada desses MDEs é feita por outros estudos, a exemplo de Curkendall et al. (2003), Dutra et al. (2005), Vogt et al. (2003). Entretanto, a avaliação morfológica específica da rede de drenagem derivada de MDEs-SRTM para subsidiar análises morfológicas de bacias é incipiente.

Para avaliar a consistência hidrológica e morfológica dos MDEs-SRTM e da rede hidrográfica derivada deles, é necessária a comparação com dados obtidos de outras fontes, a exemplo dos estudos citados anteriormente. Assim, deve-se optar por fontes com elevada acurácia para a representação do relevo e da rede de drenagem, sendo essa fonte a referência. Além disso, a avaliação deve ser realizada em escala de análise geográfica e cartográfica compatíveis para os dados avaliados e de referência. Os dados de referência são as cartas topográficas por essas serem de elevada acurácia na representação do relevo e da rede de drenagem, especificamente, conforme apresenta Nikolakopoulos et al. (2006). Assim, conseqüentemente, os dados de referência – as cartas topográficas – devem ser de mesma escala cartográfica para toda a área de estudo, a qual deve ser de escala de análise compatível à escala cartográfica.

Nessa pesquisa a área de estudo é a bacia hidrográfica do alto Rio das Velhas, localizada na região central de Minas Gerais. A escolha foi motivada pelo fato das cartas topográficas que recobrem essa área serem de mesma escala (1:50.000), da metodologia de

fotointerpretação da rede de drenagem ser homogênea para toda a área e também por essa bacia já apresentar diversos estudos geomorfológicos que podem orientar a avaliação dos MDEs e respectivas redes de drenagem.

As pesquisas geomorfológicas conduzidas no Rio das Velhas, principalmente as relativas à evolução do relevo, foram desenvolvidas desde o início do século passado (HADER e CHAMBERLIN, 1915). Mais recentemente, valiosos esforços estão sendo feitos para entender a dinâmica da paisagem da região, principalmente em sua alta bacia (VALADÃO e SILVEIRA, 1992; MAGALHÃES JR e SAADI, 1994; BACELLAR, 2000; LANA, 2004; LANA e CASTRO, 2005; SALGADO et al., 2008a). Entretanto, esses esforços não utilizam os parâmetros morfométricos com interpretações estatísticas sobre a composição do relevo. No Quadrilátero Ferrífero um estudo de análise morfométrica foi realizado para as bacias que compõem a borda leste do Complexo do Bação (SANTOS E SOBREIRA, 2008). Tais esforços são mais frequentemente realizados visando subsidiar o planejamento agrícola em áreas onde essa atividade é desenvolvida, como o Triângulo Mineiro e o Sul de Minas (FELTRAN FILHO, 2007).

Estudos geomorfológicos recentes associam a análise morfométrica a outras metodologias de análise do relevo e da dinâmica das águas superficiais (SARRIS et al., 2005; ARCOVERDE et al., 2005; LYEW-AYEE et al., 2006; MARQUES NETO e VIADANA, 2006), alcançando resultados sustentados em dados empíricos, e alguns obtidos por sensoriamento remoto (TUCKER et al., 2001; CHAUDHRY e MACKANESS, 2007). Assim, os dados e análises resultantes dessa pesquisa fornecem subsídios a novas pesquisas.

1.1 Objetivo geral e específicos

O objetivo geral dessa pesquisa é a compartimentação morfométrica da bacia do alto Rio das Velhas, utilizando o geoprocessamento, dados topográficos disponibilizados em ambiente digital, técnicas geoestatísticas, tendo como objetivos específicos:

- Gerar um MDE de resolução espacial compatível à escala de análise (bacia do alto Rio das Velhas) por interpolação geoestatística de MDE-SRTM;
- Verificar se a manutenção da consistência morfológica e hidrológica do relevo é preservada após a interpolação do MDE-SRTM;

- Verificar se há consistência morfológica e hidrológica da rede de drenagem gerada a partir do MDE-SRTM originais e interpolados;
- Apresentar as vantagens e limitações do uso do MDEs-SRTM na representação da rede de drenagem em análises regionais;
- Fornecer subsídios a futuros estudos geomorfológicos desenvolvidos na bacia do Rio das Velhas;

2 MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO E REDES DE DRENAGEM MORFOLÓGICA E HIDROLOGICAMENTE CONSISTENTES

A qualidade dos resultados obtidos em estudos geomorfológicos, que metodologicamente fazem uso do processamento digital, é definida pela qualidade dos dados primários, isto é, a qualidade dos dados iniciais orienta a qualidade das análises realizadas. Nos estudos que tem como dados primários as grades retangulares de dados de elevação topográfica – os modelos digitais de elevação regulares – a metodologia de geração, de avaliação e o tratamento estatístico aplicado a esses dados definem o grau de aproximação (ou distanciamento) que os resultados terão da realidade. Assim, a semelhança dos MDEs com o relevo por eles representados deve ser a melhor possível, já que o uso de MDEs de baixa qualidade inviabiliza interpretações de melhor qualidade. A mesma semelhança é necessária na representação da rede hidrográfica em ambiente digital por vetores. Destaca-se que além do uso de grades regulares, existem também outras formas de representação do relevo, como as grades triangulares.

A apresentação dos processos de obtenção da altimetria e de geração e tratamento dos MDEs e da rede hidrográfica vetorial são indispensáveis na avaliação da consistência morfológica e hidrológica desses dados, os quais devem ser compatíveis com as escalas de análise. Para tanto, cada MDE e respectiva rede de drenagem devem ser julgados no contexto de sua utilização. A análise morfológica de bacias hidrográficas é um dos tipos de análise de sistemas ambientais, conforme descreve Christofolleti (1999), e requisita informações relativas ao relevo e a rede de drenagem.

Esse capítulo apresenta, num primeiro momento, os MDEs, as metodologias de geração e tratamento utilizadas para que estes tenham consistência hidrológica e morfológica ao representar o relevo. Em um segundo momento são apresentadas metodologias de extração da rede hidrográfica dos MDEs encontradas na literatura sobre o assunto e discutidos os resultados obtidos.

2.1 Modelos Digitais de Elevação

Os modelos digitais de elevação (MDEs) são, em geral, dados por grades retangulares matriciais – nas quais, para cada pixel tem-se um valor numérico associado a elevação

correspondente– ou grades triangulares vetoriais – nas quais os valores são associados aos vértices.

O formato de grade retangular é mais utilizado devido ao fato de sua estrutura apresentar maior compatibilidade com as ferramentas de processamento digital de imagem. A estrutura computacional desse tipo de grade é a mesma de imagens digitais, diferenciando-se pelo fato das informações armazenadas nos pixels não serem associadas à radiação eletromagnética visível, mas sim a ondas de Radar (frequência de micro-ondas ativas) correspondentes a valores altimétricos, quando obtidos por interferometria.

Os MDEs podem ser também gerados a partir da interpolação de curvas de nível de cartas topográficas, conforme apresenta Jarvis et al. (2004). O tamanho da área representada por cada célula da grade (pixel) corresponde à resolução espacial da imagem e, intrinsecamente, define a escala de trabalho (MENEZES e COELHO NETO, 2003). Para que um MDE tenha consistência geomorfológica e hidrológica, a imagem matricial deve representar fidedignamente as feições geomorfológicas, como divisores de bacia, talwegues e elementos côncavos e convexos (ARAÚJO, 2006; PINHEIRO, 2006).

Portanto, os MDEs são gerados a partir de dados obtidos de duas fontes distintas: dados topográficos extraídos de cartas topográficas e dados de radares interferométricos. Cada um tem suas vantagens e desvantagens técnicas intrínsecas e requerem tratamento específico (VALERIANO, 2002; PINTO et al., 2004; JARVIS et al., 2004; PINHEIRO, 2006; NIKOLAKOPOULOS et al., 2006; DUARTE e ASSAD, 2007). Nos últimos anos, o aprimoramento das técnicas de interferometria por radar resultou na geração de resultados positivos na produção de modelos de elevação, o que foi aperfeiçoado pelas novas técnicas de tratamento desses dados. (JARVIS et al., 2004; PINHEIRO, 2006). O tratamento desses MDEs pode ser feito por interpoladores lineares, não-lineares e inclusive por tratamento não espacial, como o exemplo da transformação de Fourier utilizada por Costa et al. (2005) para tratar o MDE-SRTM do Estado do Rio de Janeiro.

A definição de qual o melhor tipo de tratamento a ser aplicado é correlata à escala de trabalho, sendo crucial a estratificação do tratamento de dados, seja em um domínio geomorfológico regional, em uma bacia hidrográfica, ou em vertentes (VALERIANO e GARCIA, 2000). Isso significa dizer que, para cada escala de análise geográfica, há um tipo

de tratamento específico. O tratamento de uma área de estudo em escala pequena – com menos detalhes – demanda o uso de técnicas compatíveis, sendo indispensável a conformidade morfológica dos dados com o relevo, já que as feições e aspectos estudados são de escala geográfica regional (VALADÃO, 1998; MILIARESIS, 2001; SCHEIDEGGER, 2002; SZEKELY, 2004; COSTA et al., 2005; VICENS e MARQUES, 2006; WALCOTT e SUMMERFIELD, 2007); enquanto estudos em pequena escala geográfica, por tratar de processos locais, inclusive os relativos à escala de vertentes, demandam, além da fidelidade morfológica, uma melhor resolução espacial (PISSARRA et al., 1999; VALERIANO, 2002; VALERIANO, 2003; VALERIANO e CARVALHO JÚNIOR, 2003; POLITANO e PISSARRA, 2003; ALVES e CASTRO, 2003).

Os dados altimétricos da SRTM são disponibilizados originalmente pela NASA na resolução de 30 m para os Estados Unidos da América (EUA) e em 90 metros para o resto das terras emersas do globo. Alguns autores defendem o uso dos dados de 90 metros em escala de maior detalhe que 1:250.000, devido sua elevada acurácia, podendo ser usados em escala de 1:100.000 (JARVIS et al., 2004). A desvantagem dos MDEs-SRTM é a existência de pixels com valores altimétricos espúrios, os quais podem ser corrigidos mantendo sua escala original, aplicando técnicas de correção (COSTA et al., 2005), ou melhorando a resolução dos dados, utilizando interpoladores espaciais que melhoram tanto a resolução da matriz, quanto as distorções altimétricas (VALERIANO, 2002). Hancock et al. (2006) comparam o MDE-SRTM de 90m a outros de melhor resolução espacial obtidos por imageamento aéreo e constatam que o tamanho do pixel restringe a aplicabilidade dos MDEs-SRTM de 90m a bacias de maior porte, uma vez que a generalização dos talwegues e interflúvios altera a forma e arranjo espacial do relevo na bacia.

Outro aspecto que deve ser considerado ao utilizar os MDEs-SRTM diz respeito à natureza da obtenção de dados topográficos por radares interferométricos orbitais. Por esses sistemas sensores serem estéreos, a incidência e a reflexão do feixe eletromagnético (radar) em uma superfície não plana varia de acordo com a direção e o ângulo dessa superfície. Conseqüentemente, a precisão do MDE-SRTM varia de acordo com a direção da vertente (aspecto). Assim, quando a altimetria de um MDE-SRTM é comparada a de um MDE baseados em dados topográficos, observa-se que a diferença altimétrica tem correlação com a direção da vertente, conforme ilustrado na Figura 2.1 (JARVIS et al, 2004). Entretanto,

essa variação não é significativa, já que, para algumas áreas no Brasil, a diferença entre os dados topográficos e do SRTM está em grande parte (75%) abaixo de 20 metros (PINTO et al., 2004). Outro estudo (JARVIS et al., 2004) aponta para uma melhor acurácia no MDE-SRTM, no qual os valores encontrados distam, em geral, até 8 metros dos MDE-TOPO (modelos digitais de elevação gerados a partir de cartas topográficas).

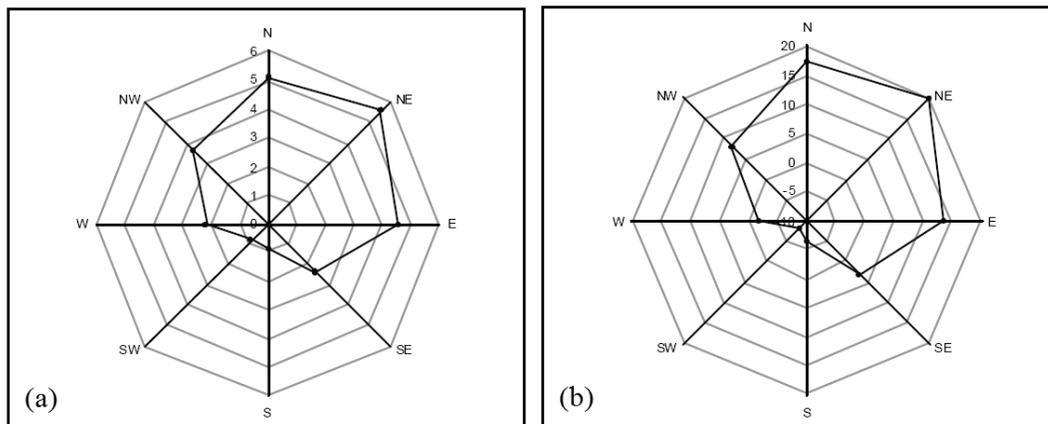


Figura 2.1 - Diferença de elevação entre DEM-SRTM e DEM-TOPO: (a) em metros; (b) em porcentagem.
Fonte: Jarvis et al. (2004, p.8).

Segundo Costa et al. (2005), a aplicação de técnicas, como a transformação de Fourier, atenua os resíduos das imagens, independente do domínio espacial, isto é, a imagem reconstituída é uma imagem melhorada pela filtragem no domínio da frequência, sendo os limiares definidos por marcos espaciais representativos como topos de grandes morros e amplos vales, além de reduzir a rugosidade do relevo. O uso dessa técnica é, em geral, feito para a melhora da frequência em imagens digitais matriciais e foi expandido para matrizes que não representam imagens, como é o caso dos modelos numéricos do terreno conforme ilustrado na Figura 2.2.

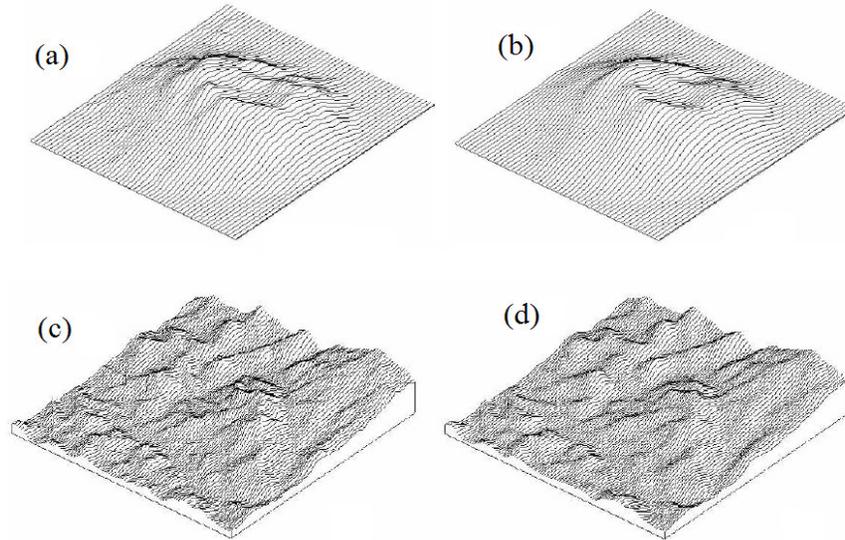


Figura 2.2 - Morfologia atenuada pela transformação inversa de Fourier: (a) Morro de São José/RJ no MDE-SRTM original; (b) Morro de São José no MDE corrigido; (c) relevo movimentado no MDE-SRTM original; (d) relevo movimentado no MDE corrigido.
 Fonte: Costa et al. (2005, p.17).

Outra técnica utilizada é a interpolação dos MDEs-SRTM ponderada pelos dados das cartas topográficas (MDE-TOPO), na qual os valores espúrios (pontos amostrais fora da distribuição normal) do MDE-SRTM são ponderados pelos valores das cartas topográficas (PINTO, 2004). Entretanto, essa técnica apresenta problemas, já que a geração de MDEs a partir de cartas topográficas apresenta problemas na frequência dos valores altimétricos, já que esses tendem a se concentrar próximos aos valores das isolinhas. Esse efeito é corrigido quando se utilizam interpoladores lineares, os quais são de fácil aplicação, entretanto, a derivação de informações topográficas fica prejudicada pelo agrupamento de seus valores em torno de valores específicos. De acordo com Valeriano (2002), a interpolação dos dados topográficos é melhor realizada por interpoladores geoestatísticos, os quais consideram a relação topológica e de tendência estatística, a exemplo da krigagem, que gera um MDE com frequência normal para os valores altimétricos e para as informações derivadas. Na Figura 2.3 é apresentado um exemplo da aplicação de três interpoladores (krigagem, linear e inverso do quadrado da distância) e a distribuição no espaço da frequência dos valores de altitude e declividade.

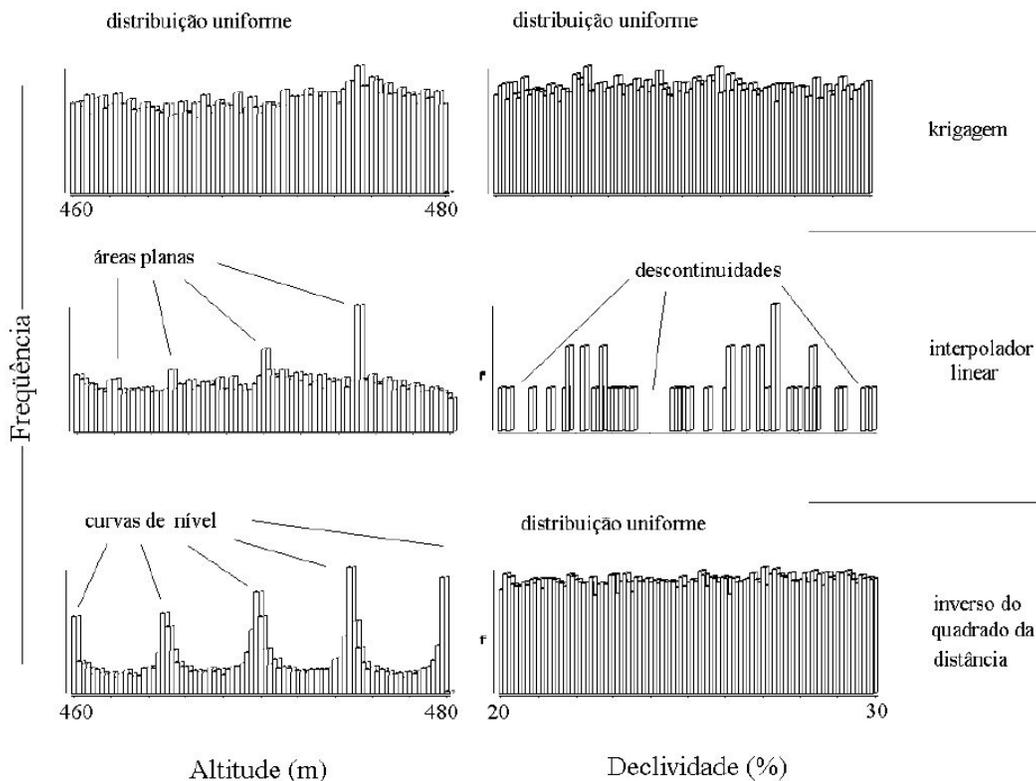


Figura 2.3 – Histograma de altitude e declividade obtido sobre MDE gerado para a mesma área a partir de dados de cartas topográficas e interpolados.
 Fonte: Valeriano (2002, p. 40).

A interpolação por krigagem suaviza o relevo, excluindo os valores extremos (picos e talvegues) que representam feições importantes da morfologia. Em contrapartida, mantém os atributos necessários para a derivação das variáveis (ou informações) geomorfológicas, o que confere a esse tipo de interpolação resultados compatíveis com as necessidades de estudos geomorfológicos de escala regional, melhorando a resolução espacial dos dados SRTM e mantendo sua qualidade topológica para derivação de variáveis geomorfológicas. Na Figura 2.4 é apresentado um exemplo da aplicação de interpolação por krigagem. Nessa figura, que representa a bacia hidrográfica do Rio Maracujá, observa-se, no MDE-SRTM original (90m), que os pixels podem ser visualmente identificados no interior dessa área e em seus limites. Essa identificação não pode ser feita no MDE-SRTM krigado (30m).

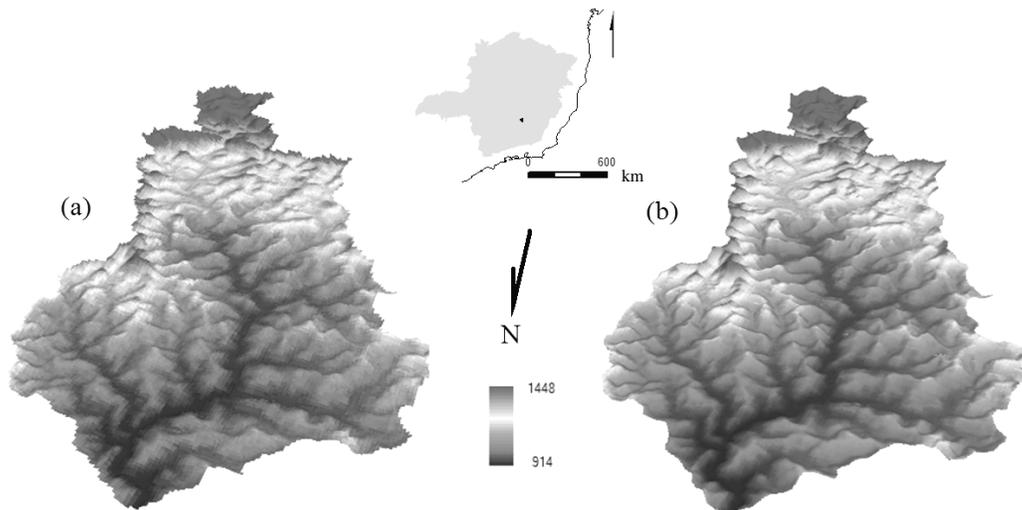


Figura 2.4 - Comparação de MDEs em perspectiva tridimensional para a bacia do rio Maracujá, região Central de Minas Gerais: (a) MDEs-SRTM original (90m); (b) MDE-SRTM interpolado por krigagem (30m).

A grande dificuldade da aplicação da interpolação por krigagem é a implementação geoestatística que demanda o entendimento de conceitos específicos por parte do operador, como o efeito pepita – efeito de aleatoriedade na definição dos valores interpolados (VALERIANO, 2002).

Com o objetivo de testar a validade hidrológica de MDE-SRTM (resolução espacial de 90m) e de dois MDEs-TOPO (resolução espacial de 90 e 25m), Jarvis et al. (2004) verificam que a interpolação linear de cartas topográficas – escala 1:50.000 – tem melhor comportamento hidrológico que os MDEs de resolução mais baixa (90m), independente da origem dos dados. Os autores afirmam que:

Para a modelagem hidrológica, os MDE-SRTM de 90m têm bom desempenho, mas estão no limite da aplicabilidade. Caso dados cartográficos de 1:25.000 e maior são disponíveis, é preferível sua digitalização e interpolação. (JARVIS, 2004, p. 29)

Nesse trabalho, os autores simulam a vazão de um rio para o MDE-SRTM 90m, MDE-TOPO 90m e MDE-TOPO 25m. Os resultados demonstram que as diferenças estão presentes nas horas iniciais, quando a infiltração e o fluxo superficial são condicionados pela condutividade hidráulica, isto é, quando a declividade e a resolução espacial do MDE influenciam a vazão com maior intensidade, conforme representado graficamente na Figura 2.5.

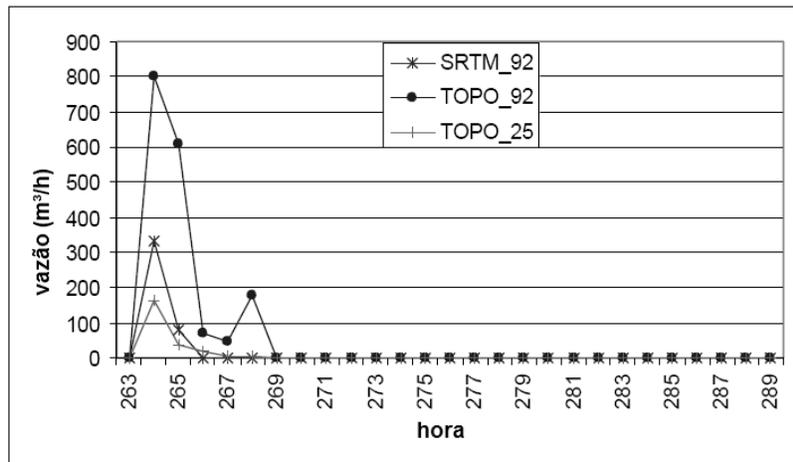


Figura 2.5 - Vazão simulada para uma bacia em três MDE diferentes, considerando um único evento de chuva e infiltração constante de 5mm/h.
 Fonte: Jarvis (2004, p.24).

Jarvis et al. (2004), entretanto, não derivam as variáveis geomorfológicas para testar a conformidade do MDE-TOPO de 25m e também não verificam se a distribuição dos valores altimétricos da matriz gerada é de distribuição estatística normal. Isso reduz a confiabilidade da metodologia apresentada por Jarvis et al. (2004), pois, considerando os resultados obtidos em outras pesquisas (VALERIANO, 2002), acredita-se que, quando aplicados interpoladores lineares, a distribuição da altitude não tenha distribuição estatística normal, como ilustrado na Figura 2.3. Pode ser dito, portanto, que a interpolação dos MDEs derivados de dados SRTM por técnicas geoestatísticas, com destaque para a krigagem, possibilita ganho na resolução espacial (de 90m para 30m), conforme apresentado por Valeriano (2002), sem maiores prejuízos à “derivabilidade” das variáveis geomorfológicas.

A krigagem consiste em um método estatístico probabilístico com dependência espacial da variância que trata variáveis regionalizadas, isto é, a organização espacial dos dados tem distribuição não aleatória e é dependente da sua estrutura intrínseca, sendo que quanto maior a distância entre os dados, menor é sua correlação. Essa variação espacial é matematicamente dada pelo variograma, que é a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores dos dados existentes nos pontos, separados por uma distância (HUIJBREGTS, 1975). Conforme apresenta Yamamoto (2003, p.1):

Como a função variograma é uma medida da variância das diferenças nos valores da variável regionalizada entre pontos separados por uma distância h ;

pontos mais próximos, por estarem correlacionados terão essa variância pequena, aumentando à medida que os pontos se distanciam. Ao contrário da função covariância, que é grande para distâncias pequenas diminuindo à medida que a distância aumenta, pois esta função mede a correlação entre pontos separados por uma distância h . A função variograma é usualmente representada sob a forma gráfica denominada variograma e a da função covariância é denominada autocorrelograma (Yamamoto, 2003, p.1).

Isso significa dizer que, graficamente, o vetor que representa o variograma possibilita a extração de parâmetros que descrevem o comportamento das variáveis regionalizáveis, a saber: amplitude, patamar, efeito pepita e variância espacial, ilustrados na Figura 2.6. A amplitude corresponde à distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes, isto é, a amplitude reflete o grau de homogeneização entre as amostras. Em síntese, quanto maior for a amplitude maior será a homogeneidade entre as amostras. O patamar é o valor h a partir do qual o variograma se estabiliza e as variáveis (dados) se tornam independentes devido à grande distância que os separa. O efeito pepita é o valor da variância aleatória, corresponde à hipótese teste (H_0), que existe devido aos erros de amostragem e a variância espacial é a diferença da variância a priori e o efeito pepita.

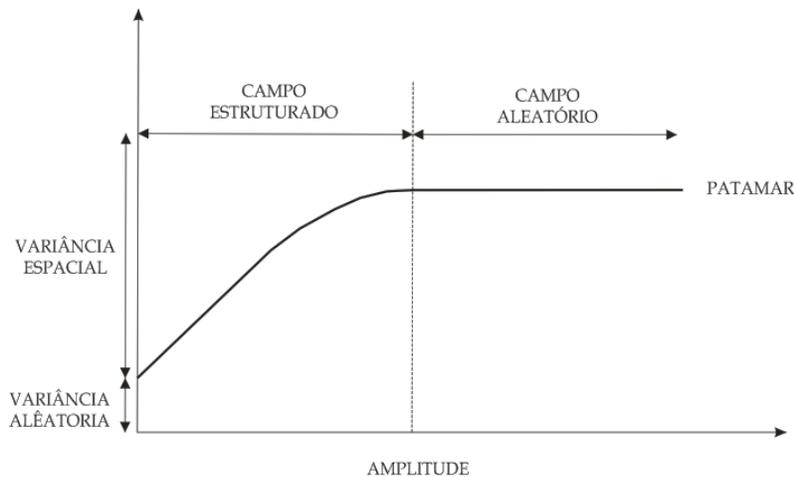


Figura 2.6 – Variograma e seus componentes.
Fonte: Adaptado de Yamamoto (2008).

Em geral, os métodos geoestatísticos, em especial a krigagem, são empregados em estudos nos quais as amostras não são distribuídas em uma grade homogênea, pelo contrário, as variáveis regionalizáveis são amostras dispersas na área de estudo. Assim, o comportamento do variograma fica mais susceptível a uma distribuição que precisa ser intensivamente tratado no variograma, ou no caso da krigagem, no semivariograma, como

ocorre em estudos epidemiológicos (MEDRONHO, 2003; OPROMOLLA et al., 2005), estudo climáticos (MELLO et al., 2006), estudos geológicos (BUBENICECK e HASS, 1969; DAVID, 1977; BROOKER, 1979) e estudos de solos (BURGUESS e WEBSTER, 1980). Outra possibilidade de aplicação é o estudo do relevo em suas diferentes escalas de análise – desde regional até vertente (VALERIANO, 2002; VALERIANO, 2004).

Especificamente nos estudos do relevo que usam as grades geradas pela SRTM, a malha de dados tem uma distribuição homogênea de 90m. Assim, os variogramas e semivariogramas têm um comportamento próximo ao ideal, já que as distorções direcionais (anisotrópicas) são mínimas. Valeriano (2004) apresenta resultados que expressam a possibilidade de aplicar um mesmo modelo geoestatístico para grandes áreas, conforme foi realizado individualmente para os estados do Acre (aplicando o modelo esférico) e de São Paulo (aplicando o modelo gaussiano). Entretanto, o autor destaca a inviabilidade de utilizar um mesmo modelo para todo o território nacional. Em contrapartida, um aspecto positivo da krigagem dos dados SRTM é a viabilidade de melhorar a resolução dos dados de 90 m (arco de 3 segundos) para 30 m (arco de 1 segundo), com ganho na representação do relevo e na qualidade da derivação das variáveis geomorfológicas. Como por exemplo, a melhoria da distribuição espacial da declividade, conforme ilustrado na Figura 2.7. Em outro estudo, o autor aplica a krigagem em dados derivados de cartas topográficas para viabilizar estudos na escala de microbacias (VALERIANO, 2002).

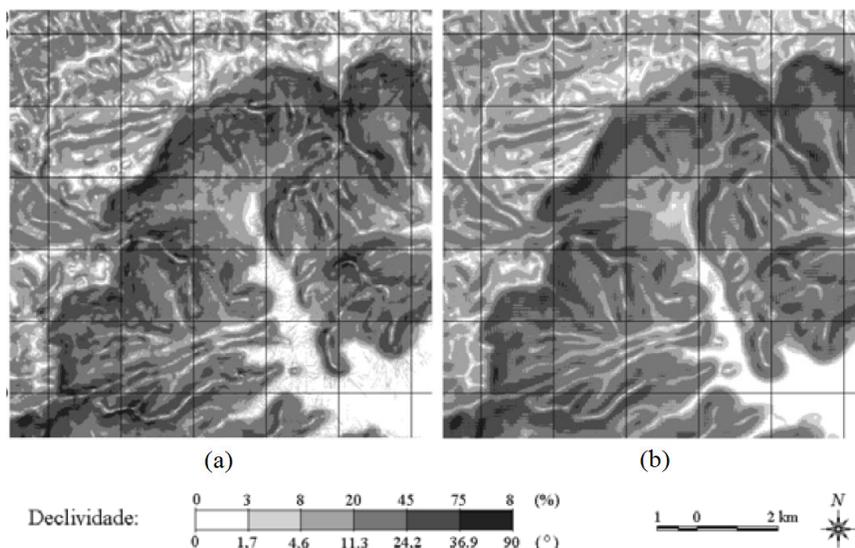


Figura 2.7 – Derivação da declividade de MDE-SRTM: (a) original e (b) krigado.

Fonte: Valeriano (2004, p.54).

2.2 Dados Vetoriais Consistentes para a Rede de Drenagem

A rede de drenagem corresponde aos eixos preferenciais das águas superficiais com fluxo concentrado de origem pluvial ou fluvial, de caráter perene, intermitente, ou efêmero. Mais especificamente, a rede hidrográfica possui como referenciais espaciais os talwegues, sendo, portanto, o conjunto de todos os canais fluviais (CHRISTOFOLETTI, 1985). Sua representação em cartas topográficas é feita por elementos lineares, independente da mídia ser analógica ou digital, sendo que em ambiente digital essa rede pode ser representada por vetores ou matrizes. Em função da escala de representação, alguns corpos d'água podem ser representados por polígonos ou linhas, por exemplo, na escala 1:10.000, um córrego de seção de 0,5 metros é representado por elementos lineares, enquanto um rio de seção de 20 metros é representado por polígonos. Essa representação por dois tipos de elementos gráficos diferentes (linha e polígono) requer a conversão em um mesmo elemento (no caso, para linha) para que a base de dados seja utilizada em estudos geomorfológicos e hidrológicos.

Nos MDEs, a rede de drenagem corresponde a uma matriz binária na qual os pixels de valor 1 correspondem as áreas de fluxo concentrado de água superficial, definido por um limiar arbitrado pelo pesquisador. Esse limiar corresponde à área necessária para gerar um canal fluvial perene. A rede de drenagem extraída dos MDEs tem sua consistência hidrológica similar à consistência dos seus respectivos MDEs, conforme apresenta Jarvis (2004) e Martinez (2004). Entretanto, a consistência morfológica da drenagem, a qual não é avaliada nesses estudos, requer outro tipo de avaliação, a qual deve verificar a representatividade morfológica dos canais fluviais gerados, visto a influência da morfologia desses canais na simulação de vazão, por exemplo.

As duas fontes de dados da rede de drenagem (cartas topográficas e MDEs) apresentam vantagens e desvantagens, as quais devem ser ponderadas para que uma delas seja escolhida. A malha vetorial da rede de drenagem é, em geral, digitalizada das cartas topográficas produzidas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), mantendo as características destas cartas, inclusive suas variações de escala e de metodologia de fotointerpretação de uma folha para outra. Essas variações, em

determinados estudos, limita o uso dessas folhas, como é o caso quando duas ou mais cartas são usadas em conjunto. O uso de outras fontes de dados é uma alternativa para resolver esses problemas, sendo a derivação da rede de drenagem em MDEs uma opção (FREITAS et al., 2005).

A consistência hidrológica desses MDEs permite que eles sejam usados em estudos ambientais de escala regional com diversos objetivos, como simulação hidrológica, compartimentação morfológica e hidrológica. Miliarensis (2001), Pinto et al. (2004), Costa et al. (2005), Freitas et al. (2005), Martinez et al. (2005) e Silveira (2006) são alguns exemplos de estudos que utilizam os MDEs com esse propósito.

A derivação da rede de drenagem dos MDEs-SRTM requer, em geral, o uso de ferramentas computacionais que realizam o tratamento hidrológico do MDE. Tarboton et al. (1991) apresentam os processos necessários para a extração da rede de drenagem desses modelos. Os autores aplicam um algoritmo em vinte e um MDEs de áreas com resolução espacial variada e observam que a densidade de drenagem é um atributo importante para que os canais tenham o comprimento real e adequado a escala de análise adotada.

Vogt et al. (2003) utilizam um MDE com resolução espacial de 250 metros para extrair a rede de drenagem em bacias hidrográficas na Itália, considerando aspectos ambientais, tais como: clima, cobertura vegetal, morfologia do terreno, solos e litologia. Os autores aplicam um limiar para cada combinação paisagística dos aspectos ambientais considerados e geram resultados consistentes.

Dutra et al. (2005) utiliza a metodologia simplificada para geração da rede de drenagem a partir de MDE para todo o Estado de Minas Gerais. A justificativa dessa metodologia é a inexistência de uma rede de drenagem homogênea para todo o estado para subsidiar estudos nessa escala de análise. Nessa metodologia, são necessários os seguintes processos: geração da grade matricial com direção do fluxo por célula; geração da grade de fluxo acumulado por célula; reclassificação binária da matriz de fluxo acumulado (1: rede hidrográfica; 0: não rede hidrográfica), sendo o limiar a área de contribuição média para formação de fluxo superficial concentrado. Entretanto, seu uso deve ser feito com parcimônia, já que utiliza um único limiar de área de contribuição. Ruzkiczay-Rudiger (2007) testa vários limiares de área de contribuição, comparando com a rede de drenagem

de cartas topográficas existentes para a região estudada. Na Figura 2.8 é possível observar que limiares menores mudam a relação de densidade de drenagem entre litotipos diferentes.

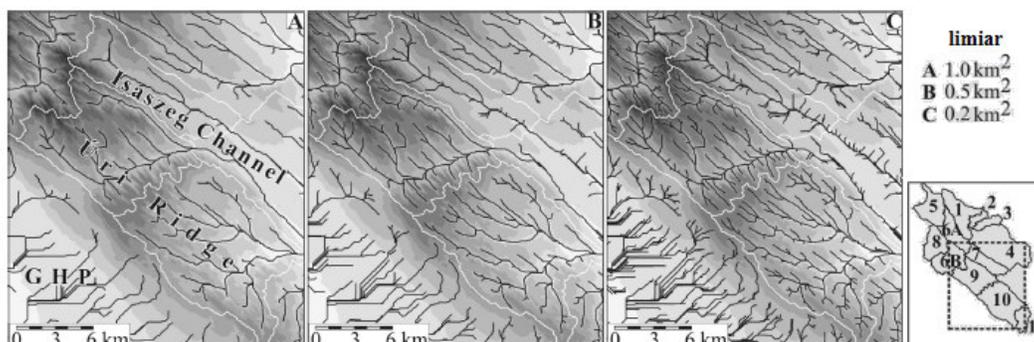


Figura 2.8 – Rede de drenagem com diferentes limiares sobreposta ao MDE.

Fonte: Ruszkiczay-Rudiger (2007, p.98).

Outra metodologia é a aplicação de algoritmos de vizinhança para extração direta da rede de drenagem dos MDEs. Nessa metodologia, conforme apresenta Valeriano (2002), é unicamente realizada a reclassificação do MDE. Entretanto, essa metodologia cria uma imagem classificada de difícil conversão para vetor, devido à problemas de continuidade da malha gerada.

Em síntese, as etapas necessárias para a geração da rede de drenagem são: geração da matriz de fluxo acumulado; conversão dessa matriz em matriz binária da rede de drenagem, testando vários limiares; e comparação das redes de drenagem geradas com diferentes limiares à rede de drenagem de cartas topográficas em escala cartográfica compatível com a utilizada (1:100.000).

Esse processamento da imagem gera resultados com grande potencial de uso, entretanto, essa derivação apresenta limitações de escala, já que alguns aspectos da morfologia dos canais, como meandros com amplitude menor que 90m, não são representados na imagem, como o exemplo apresentado na Figura 2.9 destacado pelos círculos. Esse fato expressa a necessidade do respeito à compatibilidade entre a escala cartográfica e a escala de análise geográfica. Especialmente em análises morfológicas da rede de drenagem, a resolução do MDE não pode ser inferior a sua capacidade de representar as feições analisadas, como a sinuosidade e largura do canal.

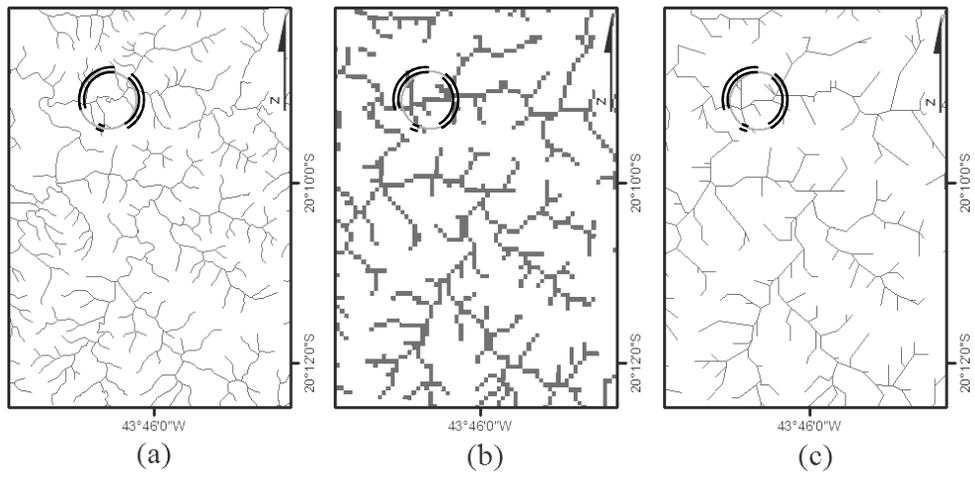


Figura 2.9 – Composição digital da rede de drenagem, variação de escala e nível de detalhe: (a) malha vetorial Geominas (1:50.000); (b) malha matricial extraída de MDE/SRTM (90m); (c) malha vetorial derivada de B.

3 ANÁLISE MORFOMÉTRICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

A análise morfométrica de bacias hidrográficas é a análise quantitativa da configuração dos elementos do modelado superficial que geram sua expressão e configuração espacial: o conjunto das vertentes e canais que compõem o relevo, sendo os valores medidos correspondentes aos atributos desses elementos (CHRISTOFOLETTI, 1999). Esse tipo de estudo geomorfológico foi introduzido por Horton (1945), visando entender a configuração e a evolução das bacias e de suas redes de drenagem. Horton apresentou as leis principais da composição da drenagem, as quais serviram de base para estudos nesta área, apresentando novos parâmetros e novas interpretações para entender o arranjo dos elementos que compõem as bacias hidrográficas.

Os sistemas ambientais são, em análises morfométricas, compostos por objetos de estudos e seus elementos componentes. Por ser uma análise quantitativa, a interpretação é feita a partir da leitura dos atributos desses elementos. A bacia hidrográfica corresponde a o objeto de estudo, sendo seus elementos, a própria bacia, a rede de drenagem e o arranjo das vertentes (relevo). Tais atributos, correlacionados entre si, geram os parâmetros morfométricos.

Os atributos da bacia hidrográfica utilizados na composição dos parâmetros morfométricos são: área da bacia; perímetro da bacia; comprimento da bacia; comprimento dos canais fluviais; comprimento vetorial (comprimento do vale) dos canais fluviais; número de canais fluviais; declividade da bacia (mínima, média e máxima); declividade dos canais; e altimetria (mínima, média e máxima). Os parâmetros correspondem às correlações existentes entre esses atributos e o relevo de uma bacia, sendo agrupados em lineares, zonais e hipsométricos. Os lineares abordam unicamente os atributos da rede de drenagem; os zonais tratam dos atributos da rede de drenagem e das áreas não hidrográficas do relevo (encostas e topos); já os hipsométricos tratam do relevo, além de correlacioná-lo à rede de drenagem e à bacia hidrográfica.

As leis de composição de bacias hidrográficas de Horton (1945), conforme apresentado por Vestena et al. (2006, p. 4), podem ser resumidas em:

- **Lei do número de canais** – o número de segmentos de ordens sucessivamente inferiores de uma dada bacia tende a formar uma progressão

geométrica, que começa com o único segmento de ordem mais elevada e cresce segundo uma taxa constante de bifurcação;

- **Lei do comprimento de canais** – o comprimento médio dos segmentos de ordens sucessivas tende a formar uma progressão geométrica cujo primeiro termo é o comprimento médio dos segmentos de primeira ordem e tem por razão uma relação de comprimento constante;
- **Lei da declividade de canais** – em uma determinada bacia, há uma relação definida entre a declividade média dos canais de certa ordem e a dos canais de ordem imediatamente superior, geometricamente inversa na qual o primeiro termo é a declividade média dos canais de primeira ordem e a razão é a relação entre os gradientes dos canais; e
- **Lei da área da bacia de canais** – as áreas médias das bacias de segmentos de canais de ordem sucessivas tendem a formar uma progressão geométrica cujo primeiro termo é a área média das bacias de primeira ordem e a razão de incremento constante é a taxa de crescimento da área.

As Leis de Horton são graficamente representadas por retas que representam a correlação entre a ordem dos canais (eixo das abcissas) e o logaritmo do valor dos parâmetros por ordem de canal (eixo das ordenadas), conforme ilustrado na Figura 3.1. Essas retas correspondem ao comportamento ideal das bacias hidrográficas para Horton (1945) e, caso esse comportamento seja observado em uma bacia, significa dizer que não há anomalias na configuração desta bacia. A partir dessas leis, outros trabalhos apresentaram parâmetros para entender e representar matematicamente a evolução e configuração de bacias hidrográficas: Strahler (1952), Schumm (1956), Strahler (1957, 1958), Chorley (1962) e Chorley e Kennedy (1971).

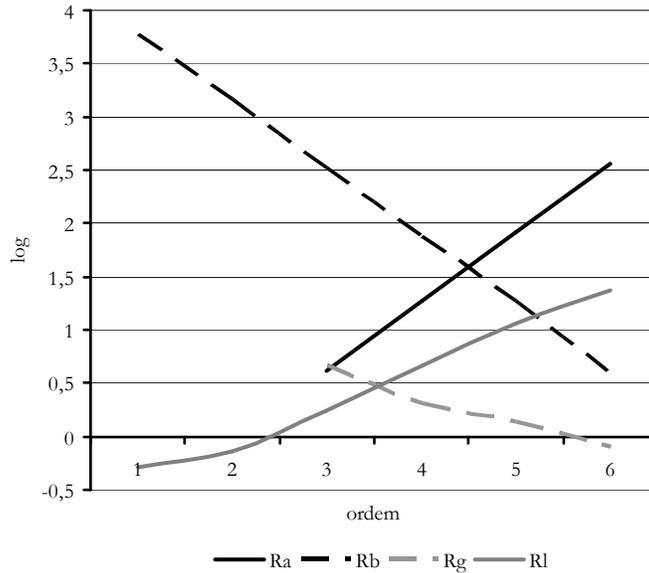


Figura 3.1 – Representação gráfica das Leis de Horton para a bacia do alto Rio das Velhas.

Com base nas leis de Horton e utilizando os parâmetros apresentados por Strahler (1952), Schumm (1956), Strahler (1957, 1958), Chorley (1962) e Chorley e Kennedy (1971), a análise morfométrica de bacias hidrográficas foi inicialmente realizada por meio de métodos analógicos, isto é, por mensuração dos atributos em cartas topográficas e cálculo manual. Com o desenvolvimento da computação eletrônica e, posteriormente, dos sistemas computacionais para cálculos e análises de dados e informações georreferenciados, estes atributos podem atualmente ser extraídos em ambiente digital, via geoprocessamento. A técnica mais comum de derivação dos atributos e subsequente cálculo dos parâmetros em ambiente digital é a partir do uso dos MDEs e da rede hidrográfica digitalizada, obtidos de cartas topográficas ou de imageamento orbital. Sobre esses dados são aplicadas rotinas computacionais para extrair os dados necessários à análise morfométrica. Como exemplo de trabalhos encontrados na literatura sobre análises morfométricas, podemos citar: Santa Catarina (1997), Valeriano e Garcia (2000), Tucker et al. (2001), Valeriano e Moraes (2001), Valeriano (2005), Hancock et al. (2006), Ganas et al (2005) e Hott et al. (2007).

A aplicação de novas metodologias na extração dos atributos e cálculo dos parâmetros a partir dos MDEs se associa a outras técnicas de mensuração de feições (formas) e fenômenos (processos) da superfície terrestre, o que permite aos pesquisadores a realização de análises morfológicas – em especial as morfométricas – e de evolução do relevo (análises

geomorfológicas), sustentadas em dados concretos e não apenas em hipóteses dedutivas (RIFFEL, 2006; RUSZKICZAY-RUDIGER, 2007; LOPES, 2008, WALCOTT e SUMMERFIELD, 2007). Isso reafirma a legitimidade do uso de parâmetros na análise de bacias hidrográficas. Devido a essa contribuição da análise morfométrica de bacias hidrográficas às análises geomorfológicas regionais, é imprescindível que os parâmetros morfométricos sejam gerados por meio de metodologias padronizadas. Assim, esses parâmetros podem representar a estruturação e configuração das bacias hidrográficas para verificar se essas estão próximas dos “padrões de normalidade”, estabelecidos inicialmente pelas leis de Horton, possibilitando, conseqüentemente, a mensuração do grau de desenvolvimento das bacias e a influência de perturbações tectônicas.

3.1 Parâmetros Morfométricos para Análise de Bacias Hidrográficas

Os parâmetros morfométricos para a análise de bacias hidrográficas são divididos em três classes. Essa divisão é condicionada pela natureza dos dados necessários para geração desses parâmetros e, conseqüentemente, pelo tipo de interpretação possível de ser realizada. Os parâmetros lineares estão associados à rede de drenagem e ao seu arranjo espacial dentro da bacia. Em linhas gerais, a unidade de medida desses parâmetros é linear (km), quando quantificam o arranjo espacial ou adimensional para parâmetros que tratam das relações entre aspectos da rede de drenagem. Os parâmetros zonais indicam as relações entre a rede de drenagem e seu arranjo espacial na bacia e são, na maioria das vezes, representados em relação à área da bacia. Os parâmetros hipsométricos representam, via de regra, a tridimensionalidade da bacia ao incluir a variação altimétrica e não tem uma unidade de medida característica (CHRISTOFOLETTI, 1980).

A seguir são apresentados os parâmetros para cada uma das três classes: linear, zonal e hipsométrica.

3.1.1 Classe Linear

Os parâmetros lineares quantificam a rede de drenagem por meio de seus atributos (compimento, número, hierarquia) e da relação entre eles, sendo dados por: hierarquia fluvial, magnitude fluvial, relação de bifurcação, relação entre o comprimento médio dos canais de cada ordem, relação entre os gradientes dos canais e índice de sinuosidade do canal principal, os quais são descritos a seguir

Hierarquia fluvial (H_f) – corresponde a ordenação dos canais fluviais dentro de uma bacia hidrográfica. Existem dois tipos de hierarquização da rede de drenagem. A primeira, de Strahler (1952), considera que os canais de primeira ordem são aqueles que não apresentam tributários, isto é, são canais de cabeceiras de drenagem, conforme ilustrado na Figura 3.2a. Os canais de segunda ordem são os canais subseqüentes à confluência de dois canais de primeira ordem e assim sucessivamente, sendo que a confluência com canais de ordem hierárquica menor não altera a hierarquização da rede. O segundo tipo de hierarquização, de Horton (1945), também considera os canais de primeira ordem os que não apresentem tributários, isto é, correspondem aos canais de cabeceiras de drenagem. Entretanto, não são todas as cabeceiras que correspondem aos canais de primeira ordem, visto que os canais de maior hierarquia estendem-se até a cabeceira de maior extensão, conforme ilustrado na Figura 3.2b. Em ambas as classificações, os segmentos de canais (trechos entre confluências) contíguos (para montante ou jusante) podem ter a mesma ordem, conforme ilustrado na Figura 3.2 (CHRISTOFOLETTI, 1970).

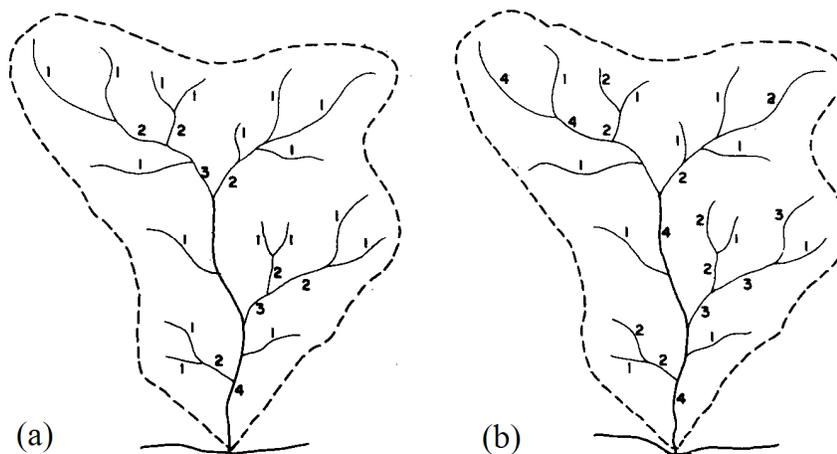


Figura 3.2 – Hierarquia fluvial definida por (a) Strahler (1952) e (b) Horton (1945).
Fonte: Christofoleti (1980, p. 107).

Magnitude fluvial (M_f) – assim como a hierarquia fluvial, a magnitude também envolve o ordenamento de canais, entretanto, todos os canais de cabeceira assumem a mesma ordem hierárquica: 1, para Shreve (1966) e 2, para Scheidegger (1965). O aumento de ordem dos canais corresponde à soma das ordens dos canais a montante da confluência; assim, o canal principal tem ordem igual ao somatório de todos os canais de primeira ordem, conforme ilustrado na Figura 3.3. O que distingue a hierarquia fluvial da magnitude é a consideração

dos princípios hidrológicos na segunda, visto que a cada confluência as características dos canais são alteradas (CHRISTOFOLETTI, 1970).

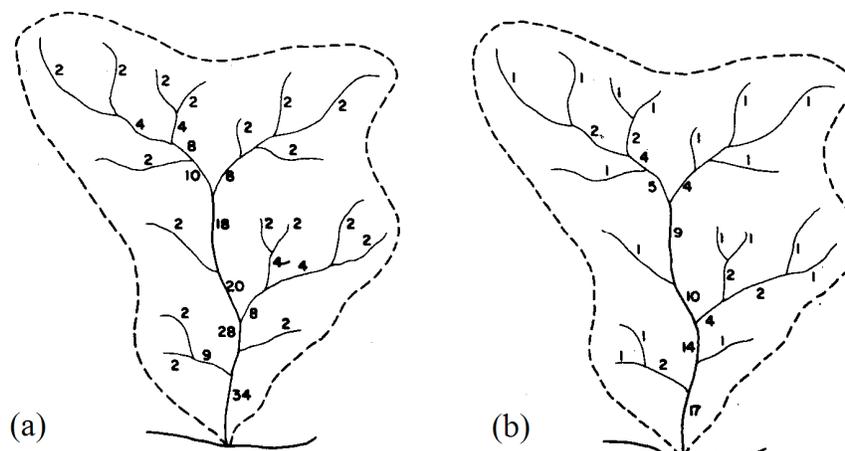


Figura 3.3 – Magnitude fluvial definida por (a) Scheidegger (1965) e (b) Shreve (1966).
Fonte: Christofoleti (1980, p. 107).

Relação de bifurcação (R_b) – parâmetro definido primeiramente por Horton (1945) e reformulado por Strahler (1952), como sendo a razão entre o número total de canais de certa ordem e o número total de canais de ordem imediatamente superior, cujos valores, dentro de uma mesma bacia, devem ser constantes e jamais inferior a 2. França (1968) verifica que esse índice está intimamente relacionado ao comportamento hidrológico dos solos, sendo maior para solos menos permeáveis e menor para solos mais permeáveis. Strahler (1952) comenta que, apesar desse parâmetro ser altamente estável, varia de acordo com o controle estrutural.

A equação utilizada é dada por:

$$R_b = \frac{N_w}{N_{w+1}} \quad (1)$$

onde: N_w é o número total de canais de determinada ordem; e N_{w+1} corresponde ao número total de canais de ordem imediatamente superior (SANTA CATARINA, 1997).

Relação entre o comprimento médio dos canais de cada ordem (RL_m) – esse parâmetro apresenta a relação de normalidade de uma dada bacia hidrográfica, sendo que o comprimento médio dos canais se ordena segundo uma série geométrica direta, cujo primeiro termo é o comprimento médio dos canais de primeira ordem, e a razão é a relação entre os comprimentos médios.

A equação utilizada é dada por:

$$RL_m = \frac{Lm_u}{Lm_{u-1}} \quad (2)$$

onde: Lm_u é o comprimento médio dos canais de determinada ordem; e Lm_{u-1} é o comprimento médio dos canais de ordem imediatamente inferior (SANTA CATARINA, 1997).

Relação entre os gradientes dos canais (R_{gc}) – é a representação matemática da terceira lei de Horton, apresentada na introdução deste capítulo, e verifica o grau de normalidade de uma dada bacia hidrográfica, relacionando a declividade média dos canais de cada ordem com a declividade dos canais de ordem imediatamente superior (CHRISTOFOLETTI, 1980). Esta relação é dada pela seguinte equação:

$$R_{gc} = \frac{G_{cw}}{G_{cw+1}} \quad (3)$$

onde: G_{cw} é a declividade média dos canais de determinada ordem; G_{cw+1} é a declividade média dos canais de ordem imediatamente superior.

Esse parâmetro possibilita a leitura isolada da normalidade da declividade dos canais de uma dada bacia por ordem e pode servir para correlacionar o grau de normalidade entre bacias adjacentes.

Índice de sinuosidade do canal principal (I_s) – parâmetro apresentado inicialmente por Horton (1945) e descrito por Alves e Castro (2003) como sendo uma das formas de representar a influência da carga sedimentar, a compartimentação litológica e estrutural. A equação utilizada no cálculo é dada por:

$$I_s = \frac{L}{d_v} \quad (4)$$

onde: L é o comprimento do canal principal; e d_v é a distância vetorial entre os pontos extremos do canal, sendo que os valores próximos a 1 indicam elevado controle estrutural ou alta energia e valores acima de 2 indicam baixa energia, sendo os valores intermediários relativos a formas transicionais entre canais retilíneos e meandrantos.

3.1.2 Classe Zonal

Os parâmetros zonais quantificam os atributos da bacia hidrográfica correlacionando-os a valores ideais e à rede de drenagem da mesma área de estudo, sendo dados por: índice de circularidade, densidade de drenagem, densidade hidrográfica, relação entre área de bacias e coeficiente de manutenção.

Índice de circularidade (I_c) – esse índice foi proposto por Miller em 1953 (CHRISTOFOLETTI, 1980) e, assim como o comprimento vetorial (d_v) do canal, o valor de I_c correlaciona um valor ideal a um mensurado. O índice de circularidade é dado pela seguinte equação:

$$I_c = \frac{A}{A_c} \quad (5)$$

onde: A é a área da bacia; A_c é a área de um círculo que tenha o perímetro idêntico ao da bacia considerada, sendo o valor máximo considerado igual a 1,0.

Conforme apresenta Alves e Castro (2003), esse parâmetro indica que uma bacia mais alongada (com índice abaixo de 0,51) favorece o escoamento e, se estiver acima de 0,51, a bacia é mais circular e tem escoamento reduzido e alta probabilidade de cheias. Além dessa relação com a velocidade do fluxo de água, esse parâmetro representa a transmissividade do escoamento superficial concentrado, isto é, se o tempo de concentração da bacia é lento ou rápido.

Densidade de rios (Dr), ou **densidade hidrográfica** (Dh) – esse parâmetro, proposto por Horton (1945), estabelece a relação entre o número de cursos d'água e a área de uma dada bacia, sendo dada pela seguinte equação:

$$Dh = \frac{N}{A} \quad (6)$$

onde: N é o número total de rios; e A é a área da bacia.

Esse parâmetro, quando gerado para os canais de primeira ordem de hierarquia fluvial, representa o comportamento hidrográfico das bacias, uma vez que, em bacias com alta densidade hidrográfica, pode-se inferir uma maior capacidade de gerar canais, independentemente de suas extensões.

Densidade de drenagem (Dd) – esse parâmetro estabelece a relação entre o comprimento total ou ordem hierárquica dos canais de drenagem e a área de drenagem, sendo dado pela seguinte equação:

$$Dd = \frac{L_t}{A} \quad (7)$$

onde: L_t é o comprimento total dos canais; A é a área total da bacia.

Esse parâmetro, ao tratar de bacias hidrográficas em um mesmo ambiente climático, representa o comportamento hidrológico definido pela litologia e estrutura geológica (lineamentos, acamamentos, falhamentos, fraturas, por exemplo), imprimindo a capacidade de infiltração e de formação de canais superficiais (CHRISTOFOLETTI, 1970).

Christofolletti (1980) comenta que a Dd apresenta relação inversa à densidade hidrográfica (Dh), visto que, segundo este autor, quanto mais canais existirem, menos extensos eles serão.

Relação entre as áreas das bacias (R_A) – esse parâmetro estabelece a relação o tamanho médio das bacias para cada um dos canais de uma determinada ordem e as bacias de ordem sucessivamente inferior, representando matematicamente a quarta lei de Horton, apresentada na introdução deste capítulo. Essa relação é dada pela seguinte equação:

$$R_A = \frac{A_w}{A_{w-1}} \quad (8)$$

onde A_w é a área média das bacias de determinada ordem; A_{w-1} é a área média das bacias de ordem imediatamente inferior.

Esse parâmetro expressa o grau de normalidade da composição da bacia apresentado por Horton e confirmado por Schumm (1956).

Coefficiente de manutenção (Cm) – esse parâmetro corresponde à área necessária a formação de um canal com fluxo perene. Entretanto, sua expressão matemática demonstra que ele nada mais é do que a razão inversa da densidade de drenagem da bacia (Dd). Schumm (1956) considera esse parâmetro um dos mais importantes para a realização de análises morfométricas. Esse parâmetro é dado seguinte equação:

$$Cm = \frac{1}{Dd} \times 1.000 \quad (9)$$

3.1.3 Classe Hipsométrica

Os parâmetros hipsométricos correlacionam a variação altimétrica à área e a rede de drenagem de uma mesma bacia, sendo representados pela curva hipsométrica, índice de rugosidade e declividade.

Curva hipsométrica (C_h) e **integral hipsométrica (I_h)** – A curva hipsométrica foi definida por Strahler (1952) como sendo a curva resultante do cruzamento entre faixas altimétricas de uma unidade geomorfológica e sua área acumulada em porcentagem, onde as abscissas correspondem a áreas acumuladas e as ordenadas as altimetria. Essa curva demonstra a composição do relevo, isto é, como a variação altimétrica se comporta dentro de uma determinada área, conforme ilustrado na Figura 3.4 para a bacia hidrográfica do Rio Uberabinha, no Triângulo Mineiro (FELTRAN FILHO e LIMA, 2007).

A integral hipsométrica é a área sob a curva hipsométrica e corresponde à composição do relevo da área de estudo. Esse parâmetro é usado para estudar a composição do relevo em estudos regionais que pretendem comparar o comportamento do relevo de um grupo de bacias frente a processos erosivos. Walcott e Summerfield (2007) utilizam esse parâmetro para comparar as bacias do Sudeste da África que drenam sobre uma mesma unidade litológica e verificar a aplicabilidade da metodologia em estudos que utilizem diferentes tamanhos de bacias hidrográficas.

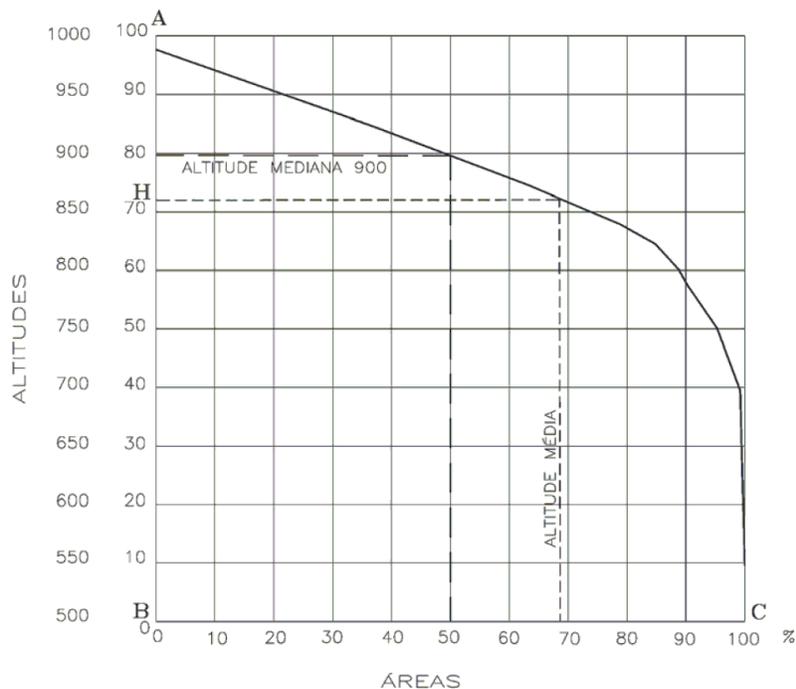


Figura 3.4 – Integral hipsométrica da bacia do Rio Uberabinha: AC - a curva hipsométrica e ABC - a integral hipsométrica.
 Fonte: Feltran Filho e Lima (2007, p. 77).

Índice de rugosidade (I_r) – expressa um número adimensional, o qual representa, segundo Strahler (1958) aspectos da declividade e comprimento da vertente por meio do contrabalanço da amplitude altimétrica (H) à densidade de drenagem (Dd), visto que

Se a Dd aumenta enquanto o valor de H permanece constante, a distância horizontal média entre a divisória e os canais adjacentes será reduzida, acompanhada de aumento na declividade das vertentes. Se o valor de H aumenta enquanto a Dd permanece constante, também aumentarão a declividade e as diferenças altimétricas entre o interflúvio e os canais. Os valores extremamente altos do índice de rugosidade ocorrem quando ambos os valores (Dd e H) são elevados, isto é, as vertentes são longas e íngremes (CHRISTOFOLETTI, 1980, p.121).

Bacias hidrográficas com I_r elevado têm maior potencial para ocorrência de cheias, visto que são bacias de alta energia (dada a elevada amplitude altimétrica) e/ou são bacias com alta transmissividade hidráulica, já que todos os pontos da bacia estão mais próximos da rede de drenagem, convertendo o fluxo de vertente em fluxo fluvial em menor tempo.

Esse parâmetro é dado pela seguinte equação:

$$I_r = \frac{H}{Dd} \quad (10)$$

Declividade média (Dm) – expressa a energia e a intensidade de atuação dos processos morfogenéticos, incluindo a dinâmica dos escoamentos superficiais concentrados e difusos (laminar) nas vertentes. Quando associada à declividade máxima, possibilita comparações sobre energia máxima e média dentro das bacias hidrográficas.

3.2 Análise Morfométrica Individual e Comparativa de Bacias Hidrográficas

A análise morfométrica pode ser realizada sobre bacias individuais ou comparando duas ou mais bacias. Cada tipo de análise requer um nível de detalhamento adequado à escala, sendo que a análise de bacias individuais requer discussão mais aprofundada sobre o que os valores dos parâmetros indicam, sendo também necessária a comparação dos valores obtidos para cada parâmetro. Para análises de duas ou mais bacias, a metodologia mais corrente aplicada é a geração de agrupamentos definidos segundo o comportamento de seus parâmetros morfométricos.

Esse tipo de análise gera um gráfico de conglomerados (*clusters*), os quais são sucessivamente agrupados de acordo com o grau de semelhança estatística. Hott et al. (2007) e Pissarra et al. (2004) usam essa técnica para agrupar as bacias como objetos semelhantes sem considerar sua distribuição espacial. Essa correlação não espacial foi pioneiramente utilizada na literatura nacional por Christofolletti (1970), ao analisar as bacias que compõem o Planalto de Poços de Caldas, conforme ilustrado na Figura 3.5. O autor aplica o coeficiente de Spearman, que trata os dados no espaço da frequência.

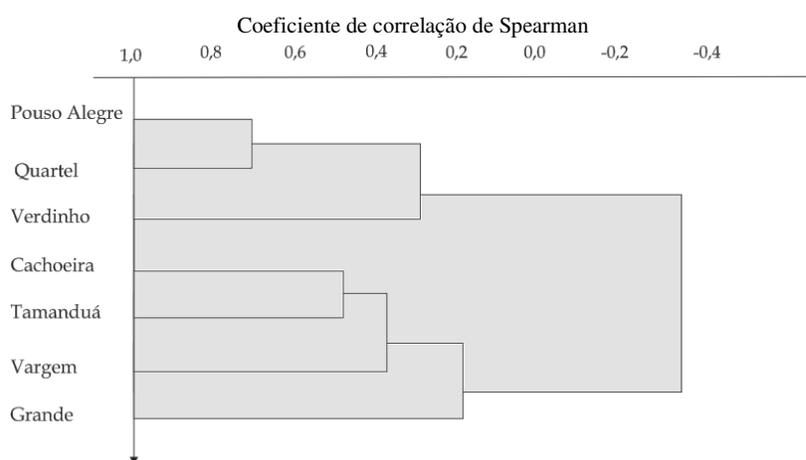


Figura 3.5 – Grupamento das bacias hidrográficas do Planalto de Poços de Caldas, Estado de Minas Gerais, dado pelo coeficiente de correlação de Spearman. Fonte: Adaptado de Christofolletti (1970).

A técnica aplicada por Hott et al. (2007) e Pissarra et al. (2004) faz o agrupamento por meio da análise hierárquica (*Hierarchical Clustering Analyses* - HCA). Nesse método, as bacias são agrupadas por pares, utilizando análise estatística multivariada. Para isso, as bacias são consideradas elementos pontuais e sua organização espacial não é considerada.

Pissarra et al. (2004) utilizam a mesma técnica para agrupar microbacias de segunda ordem de magnitude e verificar se essas bacias apresentam similaridade morfológica entre si e também se há correlação entre as características morfométricas e a distribuição dos solos dessas bacias. Os autores identificam dois grandes grupos: um composto por bacias que drenam sobre latossolos e outro sobre argissolos (PISSARRA et al., 2004). Com base nesses resultados, os autores propõem os tipos de ocupação e manejo do solo, adequados a cada porção dessa bacia.

Marques Neto e Viadana (2006) realizaram a análise de uma bacia individual para fornecer subsídios ao estudo morfotectônico da bacia do Rio Vermelho, em São Tomé das Letras, MG. Os autores aplicam parâmetros morfométricos específicos para esse tipo de estudo, os quais são propostos por Rubin (1999) com o mesmo objetivo. Marques Neto e Viadana (2006, p.75) observam que os índices utilizados – fator de simetria topográfica transversal (T) e fator de assimetria da bacia de drenagem (FABD) – apresentaram resultados que demonstram que a bacia está sobre o efeito de processos neotectônicos, os quais são observados nas Cristas Quartzíticas da região.

Outra possibilidade de aplicação de análises morfométricas é a apresentada por Martinez et al (2005). Os autores utilizam os índices sobre fontes de dados topográficos de diferentes escalas para uma mesma área. O objetivo é verificar se há perda na representação de atributos geomorfológicos e hidrológicos em MDE de diferentes resoluções obtidos de cartas topográficas e imageamento de satélite. Os parâmetros aplicados foram: área, diferença altimétrica, integral hipsométrica, hierarquia de canais, índice de bifurcação, índice de declividade, índice de comprimento de canal e convergência de rede hidrográfica. Os autores aplicaram esses índices em duas áreas de estudo diferentes com diferentes escalas geográficas, sendo que em uma foram avaliados três MDEs e na outra foram dois. Os resultados indicam que, para bacias hidrográficas de menor escala de análise, os MDEs devem ter resolução superior a 90 m e, para bacias de menor escala, não há essa necessidade (MARTINEZ et al, 2005).

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo é bacia hidrográfica do alto Rio das Velhas, porção de cabeceira da bacia do Rio das Velhas, afluente da margem direita do Rio São Francisco que drena as águas da porção central do Estado de Minas Gerais, conforme ilustrado na Figura 4.1. No contexto estadual, a bacia do alto Rio das Velhas está localizada na Mesorregião Metropolitana de Belo Horizonte, mais precisamente na Microrregião de Ouro Preto, em sua porção sul, e de Belo Horizonte, em sua porção norte. Essa bacia abrange partes dos municípios de Ouro Preto, Itabirito, Rio Acima, Nova Lima, Raposo, Sabará e Caeté, listados de SE/NW, tendo seus divisores de águas o formato grosseiro de um trapézio, os quais servem de limites políticos em alguns trechos dos perímetros dos municípios acima citados, conforme detalhado na Figura 4.2.

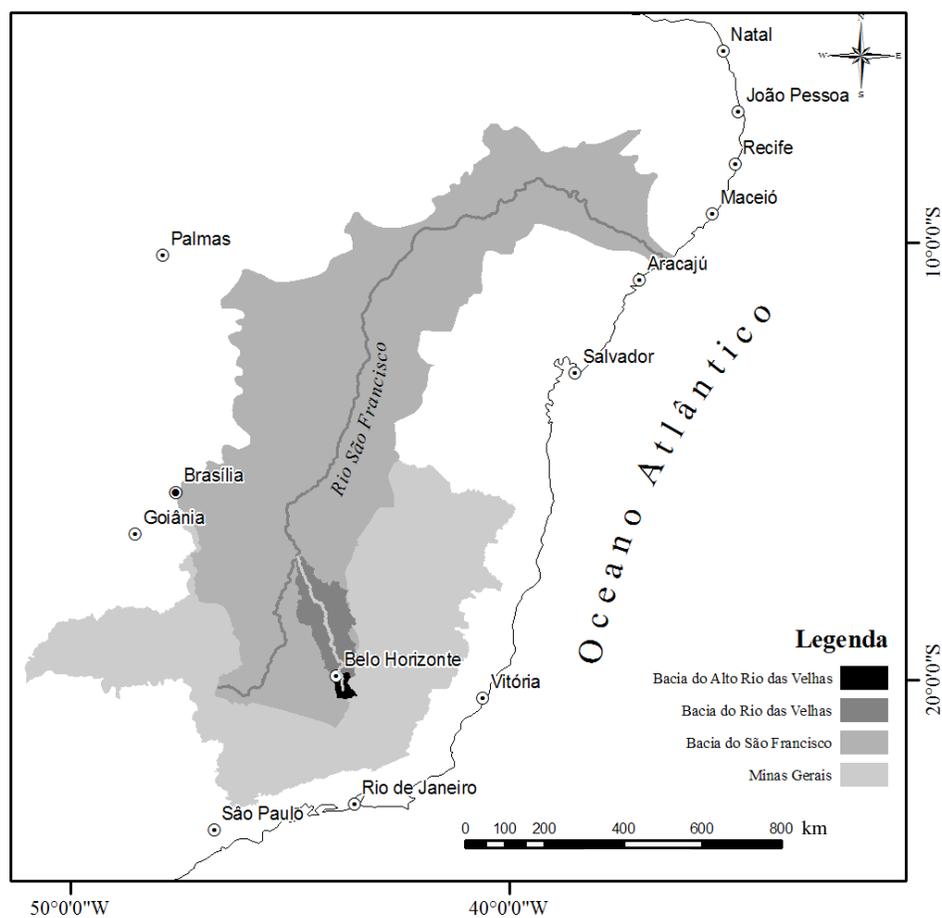
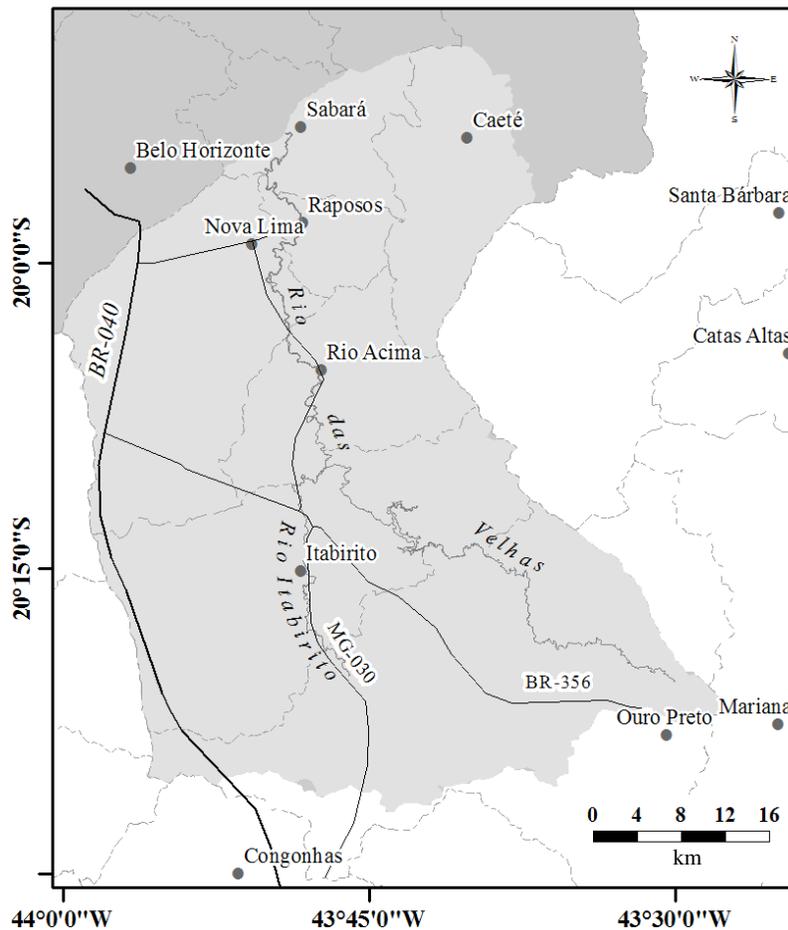


Figura 4.1 – Localização da área de estudo em escala nacional e estadual.



Legenda

-  Limite Municipal
-  Bacia do Rio das Velhas
-  Bacia do Alto Rio das Velhas

Figura 4.2 – Localização da área de estudo com detalhes da rede viária.

A bacia é cortada por três grandes rodovias: BR-040, BR-356 e MG-030. A BR-040, com orientação N/S, segue ao longo do divisor de águas oeste da bacia do Alto Rio da Velhas, ligando Brasília ao Rio de Janeiro. A BR-356, com orientação NW/SE, conecta a BR-040, próximo ao Condomínio Alfaville, à sede de Ouro Preto cruzando Itabirito. A MG-030, com orientação N/S, acompanha, partindo de Nova Lima, o vale do Rio das Velhas até a confluência com o Rio Itabirito, seguindo, a partir desse ponto, o vale desse rio até a sede do município homônimo, a partir de onde segue para Congonhas. Essa estrutura viária é apresentada na Figura 4.2.

Os atributos físicos da bacia do alto Rio das Velhas, segundo Barbosa (1980), são condicionados por sua composição geológica, tanto litológica quanto estrutural, correspondendo às terras do Quadrilátero Ferrífero quase que em sua totalidade, exceto pela Serra do Caraça. Segundo Alkimin e Marshak (1998), litologicamente, a bacia é composta pela seguinte seqüência estratigráfica: gnaisses e migmatitos arqueanos; seqüência arqueana tipo *greenstone belt* do Supergrupo Rio das Velhas; e Metassedimentos proterozóicos do Supergrupo Minas (ALKIMIM e MARSHAK, 1998). Na Figura 4.3a é mostrada esta seqüência estratigráfica. Essas fácies foram retrabalhadas por tectonismo formando uma série de sinclinais/anticlinais, com eixos principais N/S e também pela intrusão dômica de rochas arqueanas em seu interior (Complexo do Bação), sendo os principais processos de formação do relevo da bacia a erosão diferencial e a inversão do relevo (SALGADO et al., 2008b).

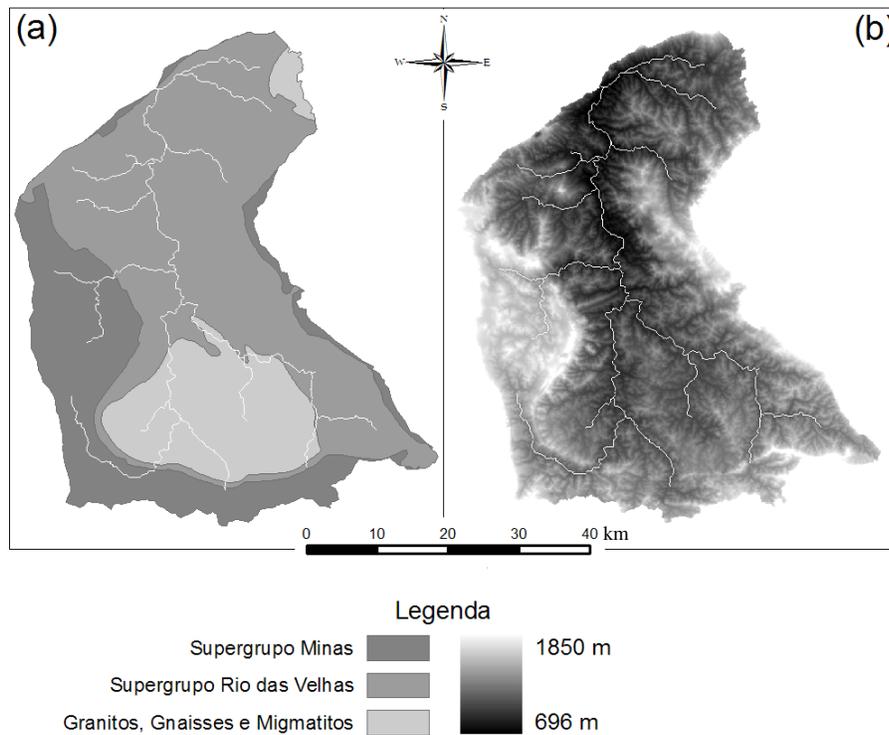


Figura 4.3 – Características físicas da bacia do alto Rio das Velhas: (a) litotípos; (b) classificação altimétrica.

Atualmente, as porções mais rebaixadas da bacia (700-800m) correspondem, majoritariamente, a colinas formadas sobre rochas arqueanas altamente friáveis; as porções

mais elevadas do relevo da bacia (cristas escarpadas acima de 1.200m, chegando a 1.700m) correspondem às bases dos sinclinais, sendo compostas por quartzitos e itabiritos do Supergrupo Minas, seqüências menos friáveis. Esses litotipos são responsáveis pela sustentação das terras médias (1.000-1.100m), localizadas no interior dos sinclinais e compostas por rochas mais friáveis, conforme ilustrado nas Figura 4.3 e Figura 4.4. Assim, observa-se que a bacia do alto Rio das Velhas é composta por três patamares de resistência frente aos processos denudacionais: rochas frágeis (rochas carbonáticas); rochas de resistência intermediária (xistos, filitos e granitos-gnaise) e; rochas resistentes (cangas, itabiritos e quartzitos) (SALGADO et al., 2008).

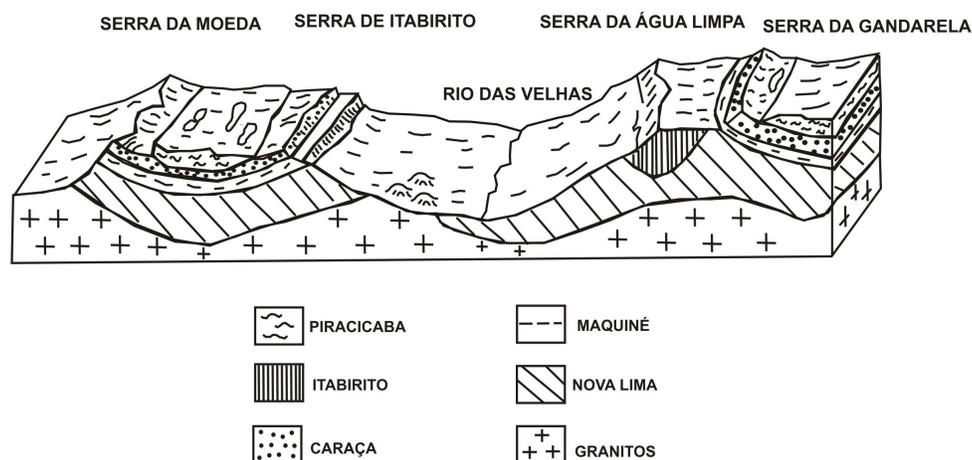


Figura 4.4 – Corte longitudinal W-E do Quadrilátero Ferrífero, representando seu relevo e unidades litoestratigráficas.
Fonte: Barbosa e Rodrigues (1967).

As terras altas correspondem aos complexos serranos que circundam a bacia do alto Rio das Velhas: Serra da Moeda e Serra de Itabirito, a oeste; Serra do Curral, a norte; Serra da Água Limpa e Serra da Gandarela, a leste; e Serra do Ouro Branco, a sul. Em geral, nessas serras desenvolvem-se neossolos litólicos. Nas terras médias, dadas às características litológicas e seu contexto geográfico, desenvolvem-se, principalmente, cambissolos. Já nas terras baixas apresentam-se latossolos. As terras baixas, conforme caracteriza Santos (2008), é constituída por colinas alongadas na direção E-W, correspondendo ao sentido predominante dos dobramentos do Supergrupo Rio das Velhas, separadas pelos afluentes do Rio das Velhas. O clima dessa bacia é tropical semi-úmido de altitude, tendo verão úmido e moderadamente quente e inverno seco e ameno (SANTOS, 2008).

5 METODOLOGIA

Os modelos para a análise morfométrica de sistemas ambientais correspondem, segundo Christofolletti (1999), ao conjunto de procedimentos que caracterizam aspectos geométricos e de composição dos sistemas ambientais, utilizando, com esse objetivo, indicadores relacionados à forma, ao arranjo estrutural e à interação entre os elementos que compõem o sistema.

Os elementos que compõem o sistema bacia hidrográfica são as vertentes e a rede de canais fluviais, os quais são também sistemas em uma escala de análise de maior detalhe. Assim, a variação da escala de análise causa a alteração intrínseca dos atributos necessários ao entendimento do sistema. Por exemplo: as vertentes são elementos componentes do sistema bacia hidrográfica, sendo que os atributos avaliados correspondem, principalmente, à forma e ao arranjo espacial. Entretanto, quando as vertentes são os sistemas analisados, os elementos componentes são de maiores detalhes: ravinas, conteúdo orgânico do solo, granulometria dentre outros. Assim sendo, pode ser dito que, além do tipo de análise realizada, o objeto de estudo (vertente, canal fluvial e bacia hidrográfica) também altera a estrutura interna do sistema bacia hidrográfica (CHRISTOFOLETTI, 1980).

A análise morfométrica de bacias hidrográficas, assim como qualquer outro tipo de análise, divide os elementos para reencontrar as suas conexões, suas relações internas no todo. Da mesma forma, compara seus atributos para melhor discernir as diferenças e semelhanças. Observa-se que a análise, em geral, se constitui de dois momentos: divisão dos elementos e estudo isolado de seus atributos; e um outro, quando há a recomposição do objeto estudado. Seguindo essa estrutura, a análise morfométrica de bacias hidrográficas pode ser metodologicamente dividida em duas fases: a análise morfométrica descritiva, quando são mensurados os atributos do relevo e da rede de drenagem para cada sub-bacia; e a análise morfométrica comparativa, quando são comparados os resultados das sub-bacias. Na primeira fase, os atributos são utilizados para caracterizar a bacia em relação a seu comportamento individual. A análise comparativa, na segunda fase, avalia o comportamento morfométrico de diversas sub-bacias de uma bacia hidrográfica e agrupa essas sub-bacias em áreas homogêneas, sendo que essa análise utiliza técnicas estatísticas espaciais ou não. Para que esse tipo de análise seja realizado, é necessário que os atributos

sejam mensurados a partir de dados topográficos em escala compatível e homogênea para toda a área de estudo.

A bacia do alto Rio das Velhas corresponde a uma área representada em sete folhas do mapeamento cartográfico na escala 1:50.000. Embora todas essas folhas estejam vetorizadas, a topologia dos vetores da rede de drenagem demanda correção e articulação dessas folhas. Uma opção frente a essa limitação é o uso de MDEs gerados a partir de dados de satélites (ASTER e SRTM) para extrair a rede de drenagem e as demais variáveis necessárias ao cálculo dos parâmetros morfométricos.

A base de dados de MDE disponível para a área são os MDEs-SRTM, com resolução espacial de 90 metros, cujo nível de detalhe inviabiliza seu uso para a área de estudo. Porém, Valeriano (2002) apresenta a interpolação geoestatística (krigagem) como uma opção para melhorar a resolução espacial de MDEs sem que haja perda na representação morfológica do relevo, sendo este o interpolador com melhores atributos para ser aplicado ao MDE-SRTM da área. Valeriano (2004) recomenda que a interpolação seja realizada para 30m. Para verificar se a interpolação foi realizada com o sucesso esperado, o MDE interpolado (krigado) tem seus atributos morfológicos comparados ao MDE-SRTM (original), sendo utilizada a curva hipsométrica (CH) e a variação da distribuição acumulada por faixa altimétrica na comparação dos modelos.

Entretanto, os objetivos de uso dos MDEs não é unicamente figurativo e não visa apenas representar o relevo, visto que em análises morfométricas a rede de drenagem é variável indispensável. Assim, a rede de drenagem deve ser extraída desses MDEs, sendo a metodologia apresentada por Tarboton et al. (1991) a que melhor se aplica. Da mesma forma que Valeriano (2002) verifica a representatividade morfológica do MDE-krigado, é necessária realizar a mesma verificação para a rede de drenagem.

Com o objetivo de verificar a potencialidade de uso da rede de drenagem gerada a partir dos MDEs-krigados, são realizadas duas análises comparativas: visual e quantitativa. A análise visual visa verificar problemas observados durante a geração da rede de drenagem e a análise quantitativa objetiva verificar se a rede de drenagem gerada a partir do MDE-krigado apresenta diferenças significativas em relação ao MDE-original e a rede de drenagem das cartas topográficas. Nessa comparação, parte-se do pressuposto que a rede

de drenagem que melhor representa a realidade é a rede das cartas topográficas, sendo que a potencialidade de utilizar a rede do MDE-krigado depende do seu grau de aproximação à rede das cartas. A análise quantitativa utiliza os seguintes parâmetros morfométricos na comparação das redes: relação de bifurcação (Rb), relação de gradiente de canais (Rg), relação de comprimento médio de canais (Lm), relação de área (RA) índice de sinuosidade (Is), densidade de drenagem (Dd) e densidade de rios (Dh). Esses parâmetros são escolhidos por serem calculados a partir de atributos da rede de drenagem.

Em seguida é realizada a análise morfométrica propriamente dita da bacia do alto Rio das Velhas, sendo utilizadas como unidades base as bacias de quinta hierarquia. Nesse momento são gerados os seguintes parâmetros morfométricos: relação de bifurcação (Rb), relação de gradiente de canais (Rg), relação de comprimento médio de canais (Lm), relação de área (RA) índice de sinuosidade (Is), densidade de drenagem (Dd), densidade de rios (Dh), índice de circularidade (IC), coeficiente de massividade (Cm), declividade média e máxima da bacia, declividade média dos canais e índice de rugosidade (Ir). A partir da comparação dos índices gerados para as bacias de quinta ordem é apresentada a compartimentação morfométrica da bacia do alto Rio das Velhas.

Em síntese, a pesquisa pode ser dividida em três grandes etapas metodológicas: preparação dos dados; extração dos parâmetros morfométricos por sub-bacia; e análise morfométrica. Para essas etapas, são necessários os seguintes materiais:

- Modelo digital de elevação (MDE) da SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), com resolução espacial de 90 metros;
- Cartas topográficas do IBGE para a área de estudo; e
- Softwares para tratamento dos dados.

As folhas topográficas do IBGE utilizadas em escala 1:50.000 são as seguintes:

- Folha Acuruí: SF-23-X-A-III-2 (IBGE, 1977a);
- Folha Belo Horizonte: SE-23-Z-C-VI-3 (IBGE, 1977b);
- Folha Caeté: SE-23-Z-C-VI-4 (IBGE, 1977c);
- Itabirito: SF-23-X-A-III-1 (IBGE, 1977d);
- Folha Mariana: SF-23-X-B-I-3 (IBGE, 1977e);

- Folha Ouro Preto: SF-23-X-A-III-4 (IBGE, 1977f); e
- Folha Rio Acima: SF-23-X-A-III-1 (IBGE, 1977g).

A seguir estão descritas os procedimentos metodológicos necessários ao cumprimento dos objetivos dessa dissertação.

5.1 Geração do Modelo Digital de Elevação e das Redes Hidrográficas Morfológica e Hidrologicamente Consistentes

A geração do MDE-krigado e das redes de drenagem para o MDE-original e krigado é realizada em quatro etapas:

- Seleção da unidade básica de análise;
- Geração de um MDE hidrologicamente consistente;
- Geração da rede hidrográfica vetorial também com consistência hidrológica; e
- Definição das sub-bacias para extração dos parâmetros morfométricos.

5.1.1 Seleção da Unidade Básica de Análise

A seleção da unidade básica de análise requer que sejam definidos três aspectos da informação espacial: sistema de coordenadas, escala dos dados de entrada e resolução espacial do dado matricial. A definição desses aspectos deve ser anterior à definição dos dados utilizados para que as feições e eventos analisados tenham conformidade com a realidade espacial, em suas localizações e arranjos espaciais.

Conforme estudo de Menezes e Coelho Neto (2003), a definição dos aspectos acima referidos deve se pautar principalmente na grandeza espacial da unidade de análise, isto é, na escala de análise geográfica. Nesse momento, é definido o nível de detalhamento das feições e dos processos analisados, o que, conseqüentemente, define a escala cartográfica e a resolução dos dados utilizados.

Nesse trabalho, o objeto de estudo é a bacia hidrográfica do alto Rio das Velhas, mais especificamente sua morfologia e rede de drenagem de suas sub-bacias hidrográficas. Desta forma, a escala de análise é regional, com área de 2.250 km², sendo a escala cartográfica adequada para estudar a bacia do alto Rio das Velhas 1:100.000. Assim, nessa pesquisa, os

vetores da rede hidrográfica devem estar na escala de 1:100.000 e, por serem avaliados aspectos hidrológicos da bacia, ambos devem ser hidrológicamente consistentes.

5.1.2 Geração de MDE Morfológica e Hidrológicamente Consistentes

Conforme Valeriano (2004), a derivação de parâmetros morfométricos primários de MDE-SRTM, extraídos por processamento direto do MDE, como declividade e aspecto do relevo, requer a melhoria de resolução de 90 para 30 m. Conseqüentemente, o mesmo acontece na geração de parâmetros morfométricos mais complexos. Valeriano (2002) recomenda a aplicação da krigagem, um processamento geoestatístico de interpolação no qual não há perda da consistência hidrológica nem topográfica.

Esse método consiste na geração de uma grade de pontos que se distanciam entre si conforme a resolução dos dados matriciais do MDE-SRTM, sendo o atributo desses pontos a altimetria. Em seguida, deve ser gerado o variograma para entender a organização dos dados e ver qual o melhor modelo (linear, esférico ou gaussiano) para interpolar uma grade de pontos com resolução espacial de 30 metros. Depois de realizada a interpolação, o arquivo de pontos deve ser convertido em imagem matricial. Em seguida, deve ser verificada a existência de depressões, nas quais a rede de drenagem perde sua continuidade (*sinks*) e ser realizada a interpolação desses pontos por seus vizinhos para corrigir o problema, (CERQUEIRA et al.,2006, p.24; RUSZKICZAY-RUDIGER, 2007). Por fim, tem-se como resultado um MDE hidrológicamente consistente. com resolução de 30 m.

5.1.3 Geração das Redes Hidrográficas com Consistência Hidrológica e Morfológica

A próxima fase da preparação dos dados é a geração da rede de drenagem vetorial, hidrológicamente consistente, para a bacia do alto Rio das Velhas.

Em linhas gerais, existem três metodologias para geração dessa base A primeira é a digitalização da hidrografia de cartas topográficas na escala utilizada. A segunda é a foto-interpretção da rede de drenagem de levantamentos aerofotogramétricos de detalhe (1:25.000). Esses processos são de mais fácil aplicação em pequenas áreas de estudo, como microbacias, ou em áreas com menor densidade da rede de drenagem (PISSARA et al., 1999; POLITANO e PISSARA, 2003; FELTRAN FILHO e LIMA, 2007). Outra opção é

a obtenção da rede de drenagem pelo tratamento de MDE, conforme metodologia apresentada por Tarboton et al. (1991). Essa metodologia está descrita na seção 2.2

Visto a necessidade de comparar a rede de drenagem obtida pelo processamento dos MDE-krigado à rede de drenagem das cartas topográficas, são necessários os seguintes procedimentos:

- Correção topológica e articulação da rede de drenagem as cartas topográficas;
- Processamento digital do MDE-original e MDE-krigado para obtenção da rede de drenagem;
- Hierarquização das três bases de redes de drenagem, segundo Strahler (1952);
- Cálculo dos parâmetros morfométricos selecionados; e
- Comparação visual e quantitativa.

5.1.4 Delimitação das Sub-Bacias para Extração dos Parâmetros Morfométricos

Essa última fase da primeira etapa consiste na delimitação das bacias hidrográficas que integram a bacia do alto Rio das Velhas e são as unidades básicas de extração e geração dos parâmetros morfométricos. Conforme discutido em Christofolletti (1970), Silva e Herpin (2006) e Wallcot e Summerfield (2007), a relativa homogeneidade geológica e a moderada amplitude altimétrica (em relação a amplitude máxima dentro da área de estudo) são aspectos imprescindíveis na definição das bacias, garantindo assim resultados mais precisos para cada uma das bacias analisadas. Os trabalhos citados demonstram a não obrigatoriedade de manter o tamanho das bacias homogêneo, conforme ilustrado na Figura 5.1.

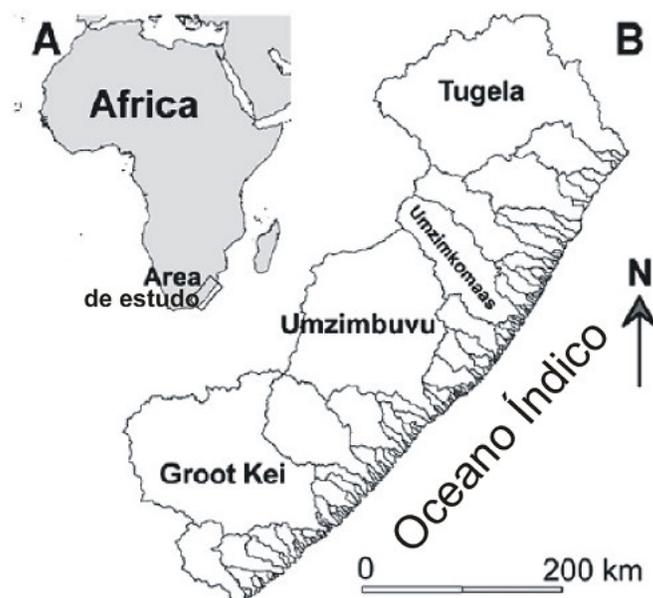


Figura 5.1 – Bacias exorréicas do sudeste da África, classificadas segundo o nível de base (Oceano Índico) e não segundo a ordem de grandeza.
 Fonte: Walcott e Summerfield (2007, p.2).

Walcott e Summerfield (2007) utilizam as bacias que drenam para o Oceano Índico e suas sub-bacias até a segunda ordem hierárquica. Seguindo a mesma lógica empregada em Walcott e Summerfield (2007), a definição das bacias analisadas nesse trabalho considera todas as bacias afluentes e subafluentes do alto curso do Rio das Velhas de terceira ordem e superior. Observa-se que, para a definição das unidades de análise, é preciso que um primeiro parâmetro morfométrico seja derivado da rede de drenagem gerada na primeira etapa da pesquisa: a hierarquia fluvial, segundo proposta de Strahler (1956). Depois de definidas as ordens dos canais fluviais, são delimitadas as sub-bacias de terceira ordem e superior que integram a bacia do alto Rio das Velhas utilizando as curvas de nível das cartas topográficas listadas na introdução desse capítulo.

A definição da ordem da rede hidrográfica utilizada na delimitação das bacias hidrográficas se deve a inviabilidade metodológica de extrair os parâmetros morfométricos, haja visto a resolução dos dados topográficos utilizados. As bacias de primeira e segunda ordem representadas na escala cartográfica de 1:100.000, ou 1:50.000, são micro-bacias hidrográficas, conforme apresenta Pissarra et al. (1999), ao estudar as bacias dos canais de primeira ordem, e Politano e Pissarra (2003), ao verificar as relações entre vazão e os

parâmetros morfométricos das micro-bacias de segunda ordem, sendo que as micro-bacias devem ser analisadas em escala cartográfica de detalhe (1:25.000 ou 1:10.000).

Assim, todas as bacias de terceira ordem e ordens superiores são delimitadas e, em seguida, são calculados os parâmetros morfométricos para cada uma delas. O índice de sinuosidade (I_s) e a declividade do canal não são calculados para os canais de terceira ordem.

5.2 Análise Morfométrica da Bacia do Alto Rio das Velhas

A análise morfométrica da bacia do alto Rio das Velhas é realizada em quatro etapas:

- Definição dos parâmetros morfométricos;
- Extração dos parâmetros morfométricos das sub-bacias de quinta ordem hierárquica;
- Preparação do banco de dados; e
- Correlação das sub-bacias para gerar a compartimentação morfométrica da bacia do alto Rio das Velhas.

5.2.1 Definição dos Parâmetros Morfométricos

Os parâmetros morfométricos aplicados nessa dissertação são selecionados de diversos trabalhos encontrados na literatura nacional, os quais têm objetivos distintos. Com isso, pretende-se fornecer o maior número possível de indicadores na descrição morfométrica das sub-bacias que integram o alto Rio das Velhas, dando subsídio à realização de uma análise morfométrica completa e à avaliação do uso dos MDEs-SRTM para esse fim.

Os estudos morfométricos utilizam alguns parâmetros chave para o entendimento da dinâmica processo-resposta do modelado da superfície terrestre, representando numericamente a morfologia da superfície terrestre. Desses parâmetros, alguns foram pioneiramente utilizados por Horton (1945), enquanto outros são derivados da correlação desses parâmetros iniciais em estudos mais recentes (RUBIN, 1999). Sendo um dos objetivos específicos avaliar a potencialidade de derivação de parâmetros morfométricos dos MDEs-SRTM, nessa fase da pesquisa não é feita distinção entre parâmetros representativos ou não.

5.2.2 Extração dos Parâmetros Morfométricos das Sub-Bacias de Quinta Ordem Hierárquica

A compartimentação da bacia do alto Rio das Velhas em sub-bacias define como os parâmetros extraídos devem ser estruturados na base de dados, isto é, cada bacia corresponde a um agrupamento de dados na base. Essa estrutura é utilizada na análise morfométrica desenvolvida em seguida, sendo que, para a geração desses parâmetros, é necessária a extração dos seguintes atributos da bacia hidrográfica e da rede de drenagem:

- área da bacia;
- perímetro da bacia;
- comprimento da bacia;
- comprimento dos canais fluviais;
- comprimento vetorial dos canais fluviais;
- número de canais fluviais;
- declividade da bacia (média, máxima, mínima);
- declividade dos canais; e
- altimetria (média, máxima, mínima, variação altimétrica dos canais e das bacias).

Esses atributos são extraídos do MDE e da rede hidrográfica e armazenados em uma base de dados previamente estruturada para receber esses dados. Esse processo é inteiramente feito em ambiente digital e permite a geração dos parâmetros e seu armazenamento em um banco de dados espacialmente indexado nos polígonos que representam as sub-bacias hidrográficas que integram a bacia do alto Rio das Velhas.

5.2.3 Preparação da Base de Dados

A base de dados gerado para esse estudo corresponde a uma tabela, na qual cada linha armazena os parâmetros de uma dada bacia e cada coluna guarda os registros de um determinado parâmetro de todas as bacias. Nessa tabela, além dos parâmetros gerados por bacia, são armazenados os registros relativos ao substrato rochoso sobre o qual a bacia drena, ao nome do curso principal que dá nome a bacia e a um código que faz a indexação

espacial dos registros, preparando os dados para serem usados na análise morfométrica e estatística das bacias.

5.2.4 Correlação das Sub-Bacias de Quinta Ordem que Integram a Bacia do Alto Rio das Velhas

A etapa final corresponde à análise morfométrica da bacia do Rio das Velhas, avaliando parâmetros gerados para a bacia como um todo, para as 19 bacias de quinta ordem hierárquica. A comparação entre as sub-bacias objetiva verificar se há padrões na organização dos valores dos parâmetros morfométricos para as sub-bacias do alto rio das Velhas. Nessa etapa é realizada uma análise morfométrica individual de toda a bacia do alto Rio das Velhas. Em seguida, é realizada a análise comparativa das 19 sub-bacias que integram a bacia do alto Rio das Velhas, seguida da compartimentação morfométrica dessa bacia.

A análise comparativa visa verificar a variação do valor dos parâmetros morfométricos entre as sub-bacias, observando se são formados agrupamentos. Essa análise é realizada pela comparação visual dos agrupamentos formados na classificação dos parâmetros por quebras-naturais, não sendo, portanto, utilizadas técnicas de estatística multivariada. A existência de agrupamentos homogêneos entre as sub-bacias para cada um dos parâmetros possibilita a proposição de regionalização da bacia em compartimentos morfométricos, a qual pode servir de base para estudos geomorfológicos e ambientais desenvolvidos na bacia em momentos futuros.

A partir dos parâmetros gerados nas análises morfométricas individual e comparativa é gerado um mapa de compartimentação da bacia do alto Rio das Velhas. Esses compartimentos são definidos pela variação espacial dos valores observados para todos os parâmetros utilizados, sendo feita a correlação da distribuição espacial de todos os parâmetros para as bacias de 5ª (quinta) ordem hierárquica que integram a bacia.

6 ANÁLISE DA CONSISTÊNCIA MORFOLÓGICA E HIDROLÓGICA DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO E REDES DE DRENAGENS GERADOS PARA A BACIA DO ALTO RIO DAS VELHAS

O MDE com resolução de 30 metros foi gerado para a alta bacia do Rio das Velhas, conforme a metodologia apresentada na Seção 5, sendo aplicado o modelo de semivariograma ordinário gaussiano, no qual a variância dos dados gerados é mínima, dada à distribuição regular dos dados iniciais. Os atributos morfológicos e hidrológicos do MDE-krigado (30m) foram comparados com os atributos do MDE-original da mesma área. A comparação morfológica é apresentada e discutida na seção 6.1 e a comparação hidrológica, na seção 6.2. Em suma, pode ser dito que o modelo digital de elevação gerado pelo processo de krigagem apresenta significativa consistência morfológica, devido a sua semelhança com o MDE-original (SRTM) e que a rede hidrográfica gerada a partir desse MDE, embora seja hidrológicamente consistente, não corresponde à rede de drenagem representadas nas folhas topográficas da área.

6.1 Krigagem do MDE-SRTM para a Bacia do Alto Rio das Velhas: Avaliação Morfológica e Hidrológica

A interpolação do MDE-SRTM por krigagem para a bacia do alto Rio das Velhas apresentou resultados apropriados à análise do relevo, confirmando a validade da interpolação de dados altimétricos, conforme os resultados obtidos por Valeriano (2002; 2004). Esse método geoestatístico, que é amplamente utilizado no tratamento de outros dados, vem se firmando no aumento da resolução e na melhoria da qualidade dos dados altimétricos. Os resultados obtidos nos experimentos realizados indicam a manutenção das características morfológicas da bacia do alto Rio das Velhas e o aumento da resolução de 90 para 30 metros, possibilitando uma melhor visualização de atributos do relevo com mais detalhes. A seguir são apresentados os resultados da comparação entre o MDE-original e o MDE-krigado, para os seguintes atributos do relevo: altitude, declividade, aspecto de vertente e consistência hidrológica. O variograma gerado, mostrado na Figura 6.1, indica que a distribuição dos dados apresenta um amplo campo estruturado e um patamar restrito (campo aleatório pouco representativo). A aplicação do modelo ordinário gaussiano permitiu que a variância espacial ficasse mais distante das amostras consideradas na

interpolação. Esse modelo, associado a um efeito pepita (variância aleatória) baixo (1,03), permite que o campo estruturado tenha alta significância na interpolação. Esse modelo apresenta comportamento de erros aleatório, isto é, os erros originários da interpolação não apresentam estrutura espacial lógica. A partir desse modelo, o MDE-krigado é gerado, sendo comparado com o MDE-original e sua rede de drenagem – classificada conforme a metodologia apresentada em Tarboton et al. (1991) – comparada as redes de drenagem extraídas do MDE-original e das cartas topográficas que integram a bacia do alto Rio das Velhas.

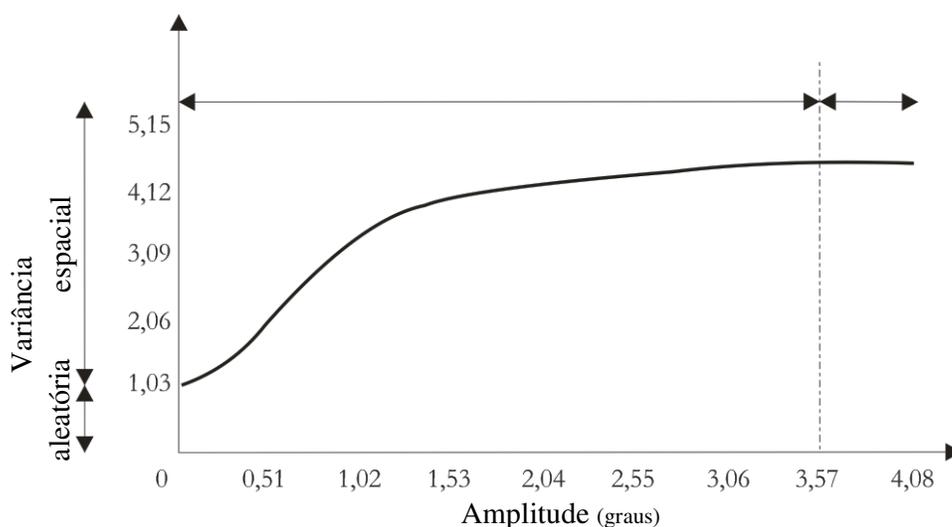


Figura 6.1 – Variograma gerado para a krigagem ordinária gaussiana do MDE-SRTM da bacia do alto Rio das Velhas.

A distribuição das faixas altimétricas do MDE-krigado, em relação ao MDE-original, se manteve inalterada, conforme ilustrado na Figura 6.2. Esse resultado demonstra que a variação da rugosidade do relevo, do encaixamento dos vale fluviais, da composição dos picos e da morfologia das vertentes desse domínio geomorfológico não influenciam na melhoria da resolução espacial do MDE-SRTM. Em contrapartida, observa-se que as áreas de picos nas regiões de relevo escarpado (bordas oeste e leste da bacia) tiveram redução altimétrica, resultado que vai ao encontro dos resultados observados em Valeriano (2004) – que aplica o mesmo interpolador, e em outros autores (JARVIS, 2004) – que aplicam outros interpoladores.

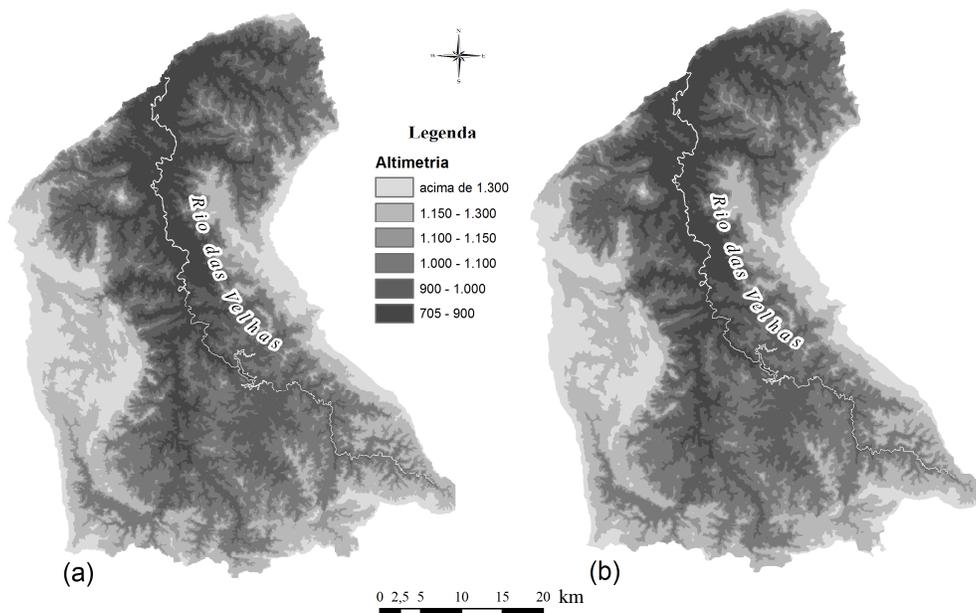


Figura 6.2 – Comparação altimétrica entre o MDE-SRTM: (a) original (90m); (b) gerado por krigagem (30m) para a bacia hidrográfica do alto Rio das Velhas.

Esse resultado possibilita a comparação dos aspectos primários extraídos dos MDEs, a saber: declividade, aspecto e comprimento de vertentes, conforme apresentado na Figura 6.3. Constata-se também para esses aspectos a manutenção da qualidade em relação aos dados extraídos do MDE-original. Visualmente, a declividade apresenta formas mais arredondadas em sua distribuição espacial e os valores de baixa declividade (topos de morros e vales fluviais) obtiveram melhoria, dada a maior contigüidade da classe “plano” para os talvegues e divisores de água, valor mais compatível com a realidade. A melhoria é observada também no aspecto (direção) das vertentes, conforme ilustrado na Figura 6.3. A imagem é constituída por pixels, cuja organização espacial corresponde a formas mais arredondadas com limites melhor definidos. Considerando que cada polígono da imagem seja uma vertente, pode ser dito que a representação do relevo por vertentes no MDE-krigado aproxima-se mais fielmente da realidade da área de estudo.

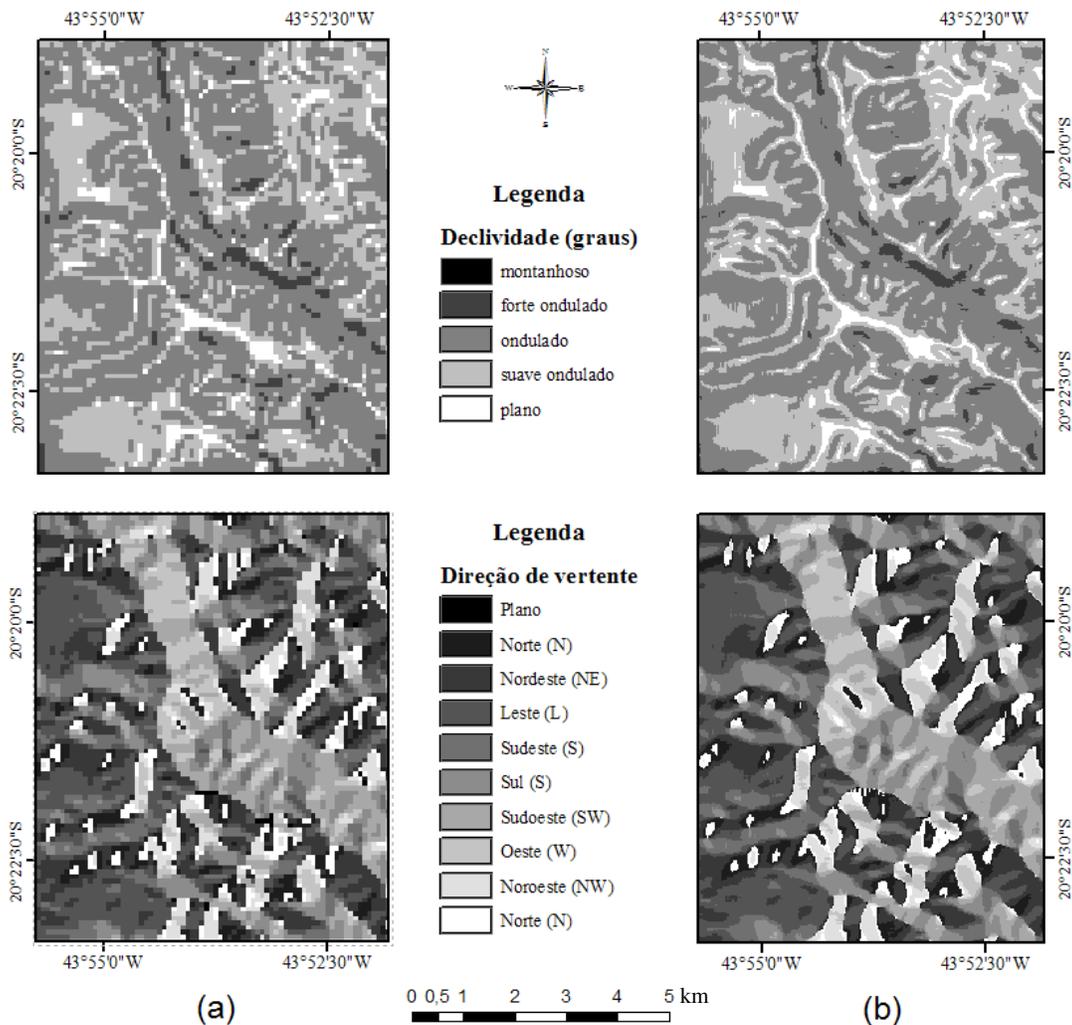


Figura 6.3 – Comparação dos aspectos do relevo no divisor de águas entre o Ribeirão do Silva e Ribeirão Carioca para os MDEs-SRTM: (a) original; (b) krigado (SW da bacia do alto Rio das Velhas).

A análise hidrológica desse MDE-krigado confirma a manutenção da consistência hidrológica do MDE-original, sendo que os pontos inconsistentes estão localizados na calha fluvial, em trechos cuja reduzida largura do vale ocasiona a inconsistência hidrológica ainda no MDE-original. Portanto, o que diferencia esses MDEs é a resolução espacial das imagens. Assim, pode ser dito que a krigagem é um método de interpolação no qual os dados finais herdam os atributos dos dados iniciais. A única inconsistência do MDE-krigado que não aparece no original é a presença de pixels que não representam a continuidade da rede de drenagem (*sinks*), conforme ilustrado na Figura 6.4.

A correção desses pontos sem continuidade hidrológica – responsáveis pela inconsistência hidrológica dos MDEs – foi feita pela interpolação sucessiva da média dos valores de altimetria da calha fluvial adjacente.

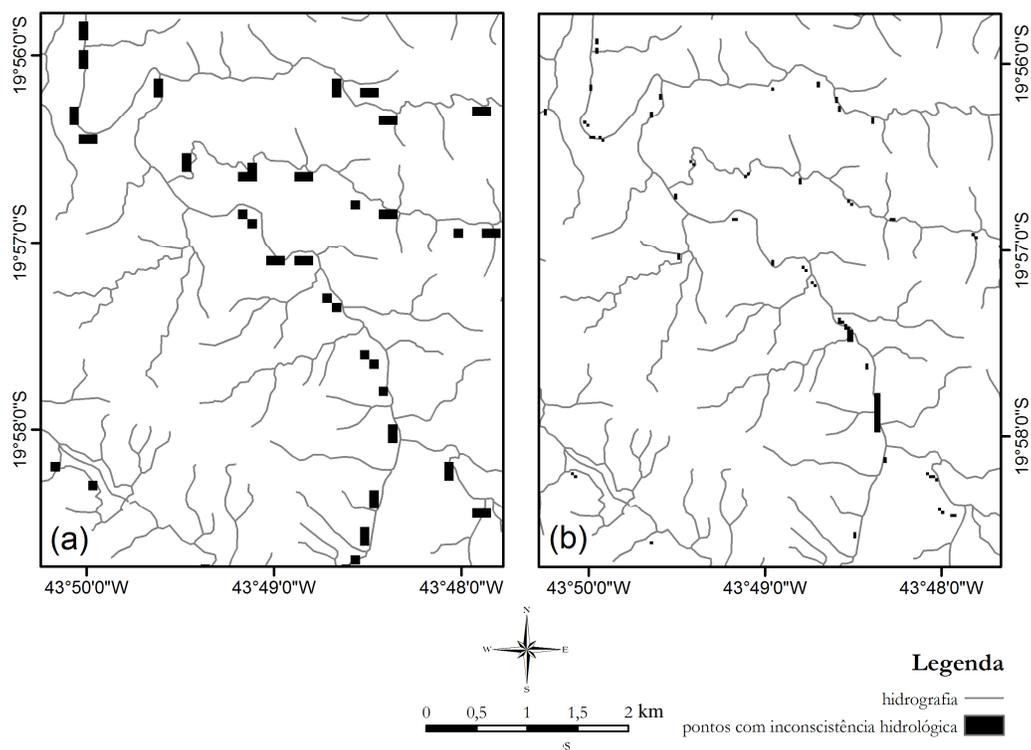


Figura 6.4 – Comparação da inconsistência hidrológica entre: (a) MDE-original e (b) MDE-krigado.

A avaliação quantitativa utiliza a curva hipsométrica para comparar a distribuição acumulada das faixas altimétricas para o MDE-original e o MDE-krigado, conforme ilustrado na Figura 6.5. Observa-se que a distribuição das faixas altimétricas entre os dois modelos não foi alterada, comprovando a manutenção da consistência morfológica após a interpolação por krigagem do MDE-original. O efeito de suavização dos topos e vales, sobre o qual Valeriano (2004) se refere, não foi observado nessa curva. Assim, os dados utilizados na composição das curvas para ambos os modelos devem ser comparados.

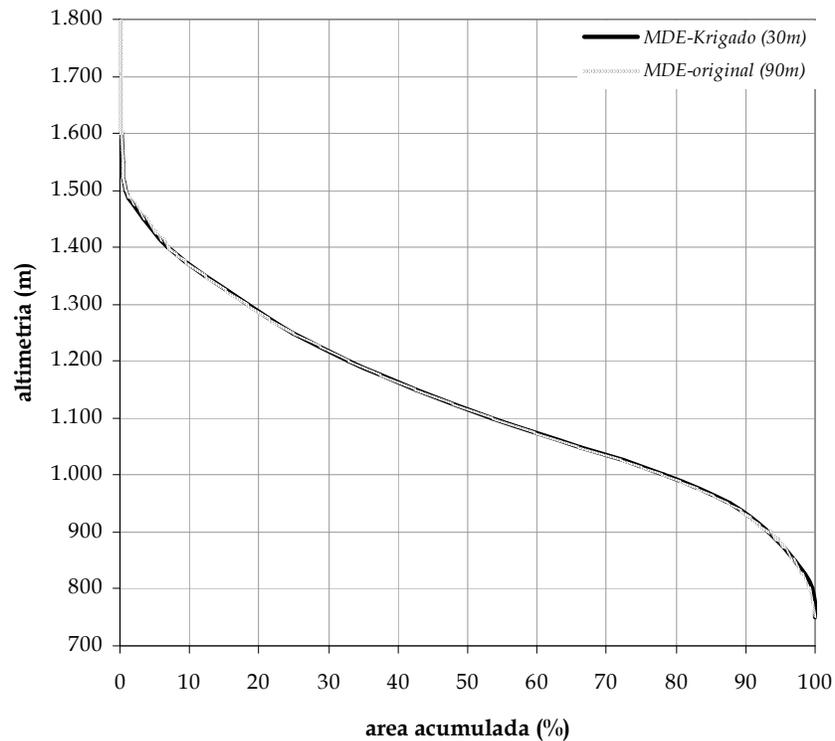


Figura 6.5 – Curvas hipsométricas do relevo da bacia do alto Rio das Velhas gerado para o MDE-original (linha azul) e MDE-krigado (linha tracejada vermelha).

Embora a curva hipsométrica não apresente alterações na representação da altimetria da bacia, a análise dos dados altimétricos tabulados, apresentados na Tabela 6.1, indica suavização do topo e dos vales. Essa comparação confirma a suavização de topos e vales sobre a qual Valeriano (2004) comenta. A faixa altimétrica que corresponde ao baixo vale da bacia estudada, situada entre 700m e 750m, sofre perda de quase 50% de sua área. As faixas altimétricas que correspondem às cristas das serras da bacia do alto Rio das Velhas, entre 1.500m e 1.850m, apresentam o mesmo comportamento de perda significativa de área quando aplicada a interpolação, conforme destacado em **negrito** na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Representação da perda de área em áreas de topo e vale pela interpolação do MDE-SRTM para a bacia do alto Rio das Velhas

<i>Faixas altimétricas</i>	<i>Área (%)</i>		
	<i>MDE-original</i>	<i>MDE-krigado</i>	<i>Perda/ganho</i>
700 - 750	0,8516	0,4570	-46,33
750 - 800	2,2410	2,5258	12,71
800 - 850	3,6253	3,6238	-0,04
850 - 900	5,7590	5,7179	-0,71
900 - 950	9,4800	9,4124	-0,71
950 - 1000	12,0381	12,1790	1,17
1000 - 1050	12,2918	12,4579	1,35
1050 - 1100	11,1731	11,1829	0,09
1100 - 1150	9,5869	9,6651	0,82
1150 - 1200	7,7540	7,8066	0,68
1200 - 1250	6,6462	6,5640	-1,24
1250 - 1300	6,1395	6,1941	0,89
1300 - 1350	5,3180	5,3671	0,92
1350 - 1400	3,5452	3,5148	-0,86
1400 - 1450	2,6505	2,5974	-2,00
1450 - 1500	0,3965	0,3503	-11,63
1500 - 1550	0,2069	0,1843	-10,94
1550 - 1600	0,1315	0,1225	-6,90
1600 - 1650	0,0533	0,0417	-21,79
1650 - 1700	0,0442	0,0191	-56,78
1700 - 1750	0,0435	0,0101	-76,88
1750 - 1850	0,0239	0,0062	-74,04
total	100,0000	100,0000	-

Portanto, pode-se concluir que o método geoestatístico aplicado (krigagem) confere confiabilidade aos dados SRTM para que seja usado em análises morfológicas qualitativas e quantitativas (morfométricas) de bacias hidrográficas em escala de maior detalhe – especialmente para a escala cartográfica 1:50.000. Entretanto, para que sua aplicabilidade seja completa, é necessária a avaliação da morfologia da rede hidrográfica derivada desse modelo.

6.2 Comparação da Rede de Drenagem Extraída de MDE-original, MDE-krigado e de Base Cartográfica do IBGE: Avaliação para Uso em Análise Morfométrica de Bacias Hidrográfica

A análise morfométrica de bacias hidrográficas em ambiente digital utiliza, como dados de entrada para a rede hidrográfica, vetores obtidos das cartas topográficas ou vetores gerados a partir de MDEs. A escolha de qual dessas duas fontes de dados deve ser utilizada passa tanto por fatores de disponibilidade dos dados quanto por fatores relativos à compatibilidade desses com a escala de análise. A qualidade morfológica dos dados dos

MDEs-SRTM original e interpolado possibilita a geração de parâmetro morfométricos a partir desses dados. Entretanto, a geração dos parâmetros que demandam dados relativos à rede de drenagem é condicionada não pela qualidade morfológica ou consistência hidrológica do MDE, mas sim pela capacidade do MDE em representar a morfologia dos canais em estudos de menor e maior detalhe. Para a bacia do alto Rio das Velhas, ambas as fontes de dados são adequadas, por ser a análise em escala regional e o MDE-krigado permitir a derivação da rede de drenagem em escala compatível com o estudo (1:50.000) e as cartas topográficas que recobrem a área dessa bacia serem todas de mesma escala cartográfica (1:50.000) – escala cartográfica compatível com a escala de análise da área de estudo.

O uso dos dados cartográficos de cartas topográficas pode ser inviabilizado em estudos nos quais as cartas que recobrem a área analisada são geradas em escalas e por metodologias distintas. Neste caso, é necessária uma outra fonte de dados. A rede hidrográfica obtida a partir de imagens SRTM é uma opção para resolver este problema. Entretanto, esses dados também apresentam limitações, as quais são relativas à resolução espacial da imagem e à topologia dos dados, a saber: reflectância dos corpos d'água para micro-ondas, estrangulamento de vale, confusão entre vale e canal. A primeira dessas limitações é relativa à própria natureza da obtenção remota dos dados de altimetria. Por a água absorver os raios de micro-ondas, os valores dos corpos d'água nas matrizes são negativos, Assim, lagos e rios com largura maior do que 90 metros corresponderão sempre a vazios na matriz. Para corrigir esse problema, é, comumente, realizada uma operação de preenchimento de vazios, descrita em Ruzkiczay-Rudiger (2007). Essa operação, quando utilizada para correção altimétrica em rios largos, lagoas e represas, gera vários talwegues alinhados uns aos outros. Assim, pode se dizer que, ao invés de representar a feição imageada, a imagem gera feições sem correspondência com a realidade.

Essa inconformidade acontece também quando os canais são mais estreitos que um pixel na resolução da imagem (90m para a imagem SRTM) e seus respectivos vales fluviais são mais largos que dois pixels, ao invés de representar o canal, pois o que é considerado como talvegue é o vale e não de fato o rio. Assim, na escala de análise em que estes canais são analisados, o uso de MDEs-SRTM gera representações inexistentes.

Devido ao tamanho da área representada por um pixel ser igual a 90m, é necessário que uma determinada feição do relevo tenha pelo menos a largura de 360 m, o que corresponde a 4 pixels. Essa resolução inviabiliza o imageamento dos canais fluviais que drenam sobre depósitos aluviais, isto é, canais que apresentam vales fluviais de larga seção. Os vales são reconhecidos como sendo canais nas imagens, ocasionando erros na morfologia do canal e, conseqüentemente, problemas na extração das medidas da rede de drenagem. Esse problema acontece caso haja o desenvolvimento de vales aluviais em pequenos canais fluviais, tendo expressividade quando ocorrem em muitos canais fluviais em uma mesma área.

A rede de drenagem é indispensável para a geração dos parâmetros morfométricos. Para que esses parâmetros sejam gerados para a bacia do alto Rio das Velhas, é preciso realizar o processamento da informação espacial contida nos dados associados a esta bacia. Para esse processamento, faz-se necessária a compatibilização topológica dos vetores que representam a rede de drenagem com as informações necessárias à composição dos parâmetros morfométricos. Assim, os dados vetoriais devem apresentar as seguintes características: cada canal de drenagem deve corresponder a um único vetor, quaisquer corpos d'água que sejam representados por polígonos devem ser convertidos em linhas, todos os vetores que não estejam conectados à rede de drenagem devem ser corrigidos (excluídos, caso não sejam um canal fluvial). E esse tratamento é necessário para que a rede de drenagem das cartas topográficas digitalizadas seja utilizada.

A derivação da rede de drenagem do MDE, conforme descrito na Seção 5.1.3, requer o tratamento do MDE e subseqüente conversão em vetores. Essa etapa é seguida da avaliação da qualidade da rede de drenagem derivada do MDE-krigado, que deve ser, inicialmente, comparada à rede de drenagem derivada de MDE-original da mesma área, para verificar quais são as vantagens de extrair a rede de drenagem de um MDE de melhor resolução. Em geral, observa-se que os problemas da rede de drenagem derivada do MDE-krigado são oriundos da limitação do próprio MDE-original em representar os canais fluviais estreitos em vales largos. Devido a esse problema, é necessária a comparação da rede de drenagem derivada do MDE-krigado à rede de drenagem das cartas topográficas do IBGE da área de estudo, na escala de 1:50.000. Essa comparação tem o objetivo de

verificar se a rede gerada tem as características necessárias para seu uso em análises morfométricas.

Em contraste a rede de drenagem gerada a partir de MDEs, a representação dos canais fluviais nas folhas topográficas é obtida pela interpretação analógica de fotos aéreas, assim, em uma determinada escala cartográfica, há correspondência máxima entre a carta e a área representada. A área de estudo dessa pesquisa, a alta bacia do Rio das Velhas, corresponde a trechos de sete cartas topográficas com mesma escala, 1:50.000, sendo que todas foram produzidas pelo IBGE (1977a, b, c, d, e, f, g). Assim, em toda a bacia, a metodologia de obtenção da rede de drenagem é a mesma, aspecto esse que viabiliza o uso dessas cartas em análises da rede de drenagem.

Nas cartas topográficas, a rede de drenagem é representada por elementos lineares (cursos d'água córregos, ribeirões e rios) e zonais (corpos d'água – lagos, represas; cursos d'água largos). Quando convertidos em arquivos vetoriais, tais elementos correspondem a linhas e polígonos, respectivamente. E, se utilizados em análises morfométricas, todos os elementos devem ser convertidos para elementos lineares. Esse tipo de tratamento corrige topologicamente os dados cartográficos para que eles sejam usados em análises quantitativas. Para usar a rede de drenagem, as correções topológicas necessárias são as seguintes: articulação dos vetores nos limites entre folhas, concatenação dos vetores que representam o mesmo canal fluvial, exclusão dos vetores que não representam a rede de drenagem e conversão dos corpos d'água representados por polígonos em linhas. Após realizadas essas etapas, a rede de drenagem dos vetores das cartas topográficas estão prontos para o tratamento espacial de qualquer natureza.

Os resultados apresentados a seguir correspondem à avaliação e à comparação das redes de drenagem geradas a partir dos MDE-original e MDE-krigado e extraída das folhas topográficas que integram a alta bacia do Rio das Velhas. Para evitar análises incompletas, além de avaliar as redes de drenagem geradas a partir de MDEs, são avaliados os resultados parciais de cada processo na geração dessas redes. A rede de drenagem derivada do MDE-original e do MDE-krigado – segundo a metodologia apresentada por Ruzkiczay-Rudiger (2007) – é composta por vetores classificados segundo a ordem hierárquica da classificação de Strahler (1952).

A análise dos MDEs-original e krigado permite a verificação da presença de problemas topológicos esparsos associados a corpos d'água, os quais geram inconsistência hidrológica (descontinuidade no fluxo superficial) ao longo dos canais fluviais e cavas preenchidas por água, conforme apresentado na Figura 6.6. No MDE-original, os pixels que impedem a continuidade do fluxo superficial estão localizados homogeneamente ao longo da rede de drenagem, o que indica que, de alguma forma, os lagos das cavas da área não são identificados. No MDE-krigado, as cavas são identificadas, já que existem agrupamentos desses pixels nessas áreas, conforme ilustrado na Figura 6.6.

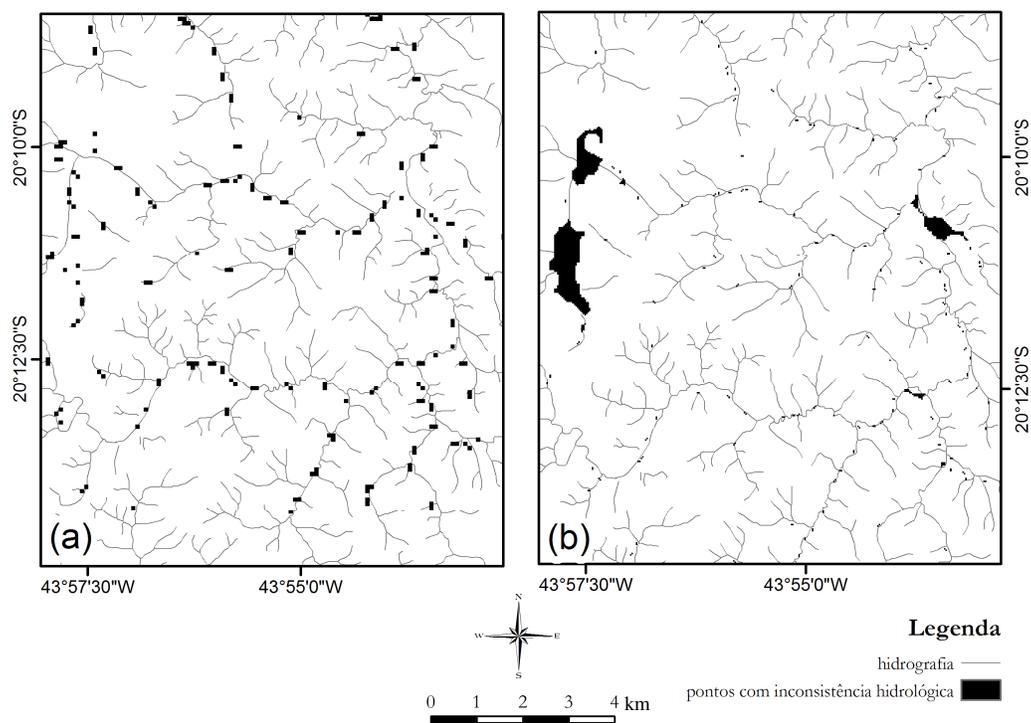


Figura 6.6 – Comparação da inconsistência hidrológica em áreas de corpos d'água na Serra da Moeda: (a) MDE-original, (b) MDE-krigado.

A correção da inconsistência hidrológica dos MDEs pela reamostragem dos pixels inconsistentes com seus vizinhos ocasionou outro problema: a geração de ondulações na topografia. Essas ondulações fazem com que sejam gerados canais sem quaisquer conformidades com a rede de drenagem e a topografia da área representada, conforme ilustrado na Figura 6.7. Além desse fato, a rede de drenagem apresentou trechos nos quais os canais fluviais são “capturados” por outras cabeceiras, problema destacado pelos círculos na Figura 6.7. Esse problema resulta em um arranjo da rede de drenagem que não

corresponde a realidade, fazendo com que os parâmetros morfométricos gerados para essas bacias não sejam representativos.

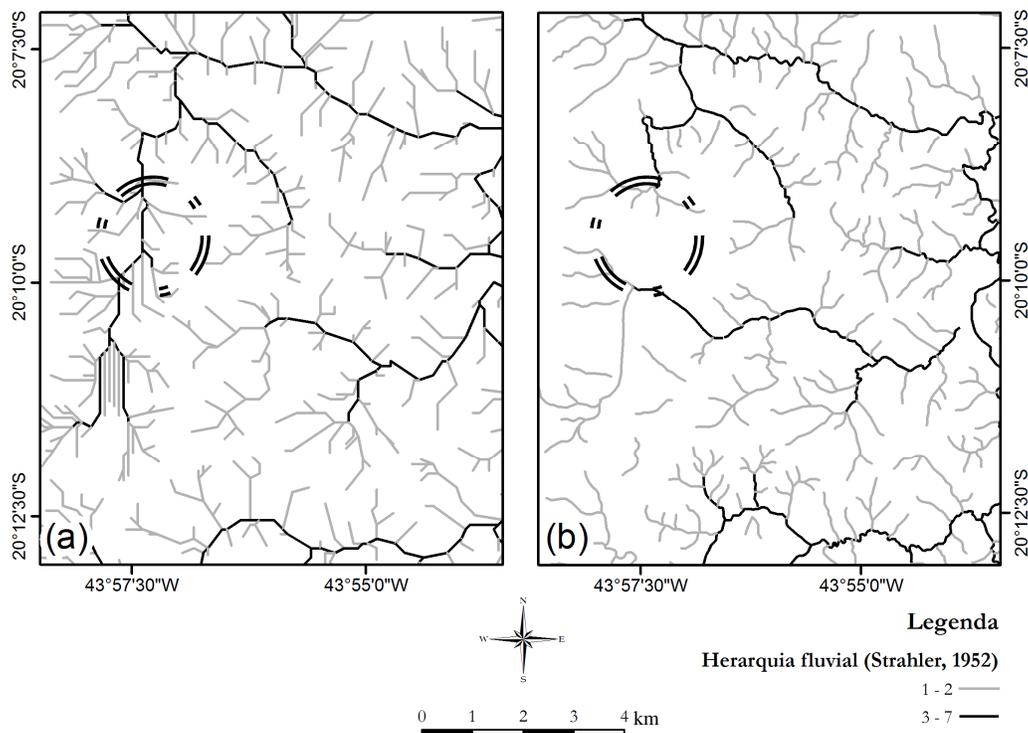


Figura 6.7 – Conflito topológico nos trechos da rede de drenagem de cavas, borda W da Sinclinal Moeda, destaque para a diferença no arranjo da rede de drenagem gerada a partir de (a) MDE-original e (b) folha topográfica – 1:50.000.

Outro problema verificado é a perda do detalhamento morfológico dos canais fluviais. Essa inconsistência se deve ao fato dos vetores da rede de drenagem gerada a partir de MDE corresponderem a segmentos retilíneos. Assim, a sinuosidade dos canais fluviais não é representada para os canais de baixa ordem hierárquica, especialmente os abrangidos pelo intervalo de segunda a quinta ordem, conforme ilustrado na Figura 6.8. A sinuosidade dos canais é observada apenas em canais de ordem seis e superior. Entretanto, canais dessa ordem correspondem a menos de 5% dos canais da alta bacia do Rio das Velhas. Caso a análise fosse realizada para a bacia do Rio das Velhas inteira, esses canais seriam mais representativos.

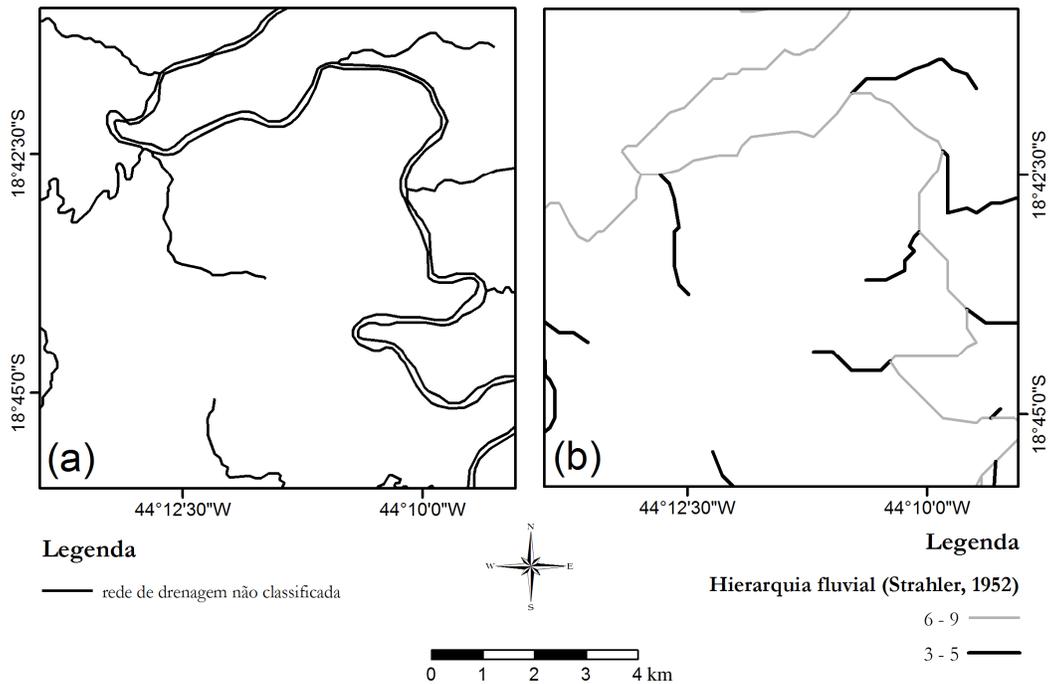


Figura 6.8 – Comparação da sinuosidade dos canais da bacia do Rio das Velhas: rede de drenagem extraída de (a) carta topográfica do IBGE em escala de 1:50.000; e (b) MDE-original.

Outro problema é a geração de canais paralelos aos canais com largura superior a 200 m. No médio e baixo rio das Velhas, trechos nos quais a largura do canal é superior a esse valor, especialmente onde há elevada sinuosidade, são gerados inúmeros canais de primeira ordem margeando o canal principal, problema ilustrado na Figura 6.9. Para que esse problema seja resolvido, o MDE deve ter todos os corpos d'água e canais largos corrigidos por outra metodologia que não seja a reamostragem dos valores extremos (preenchimento dos *sinks*). Entretanto, esse problema não é observado na rede de drenagem da bacia do alto Rio das Velhas, visto o fato da largura dos canais que compõem essa bacia ser inferior ao limiar apresentado.

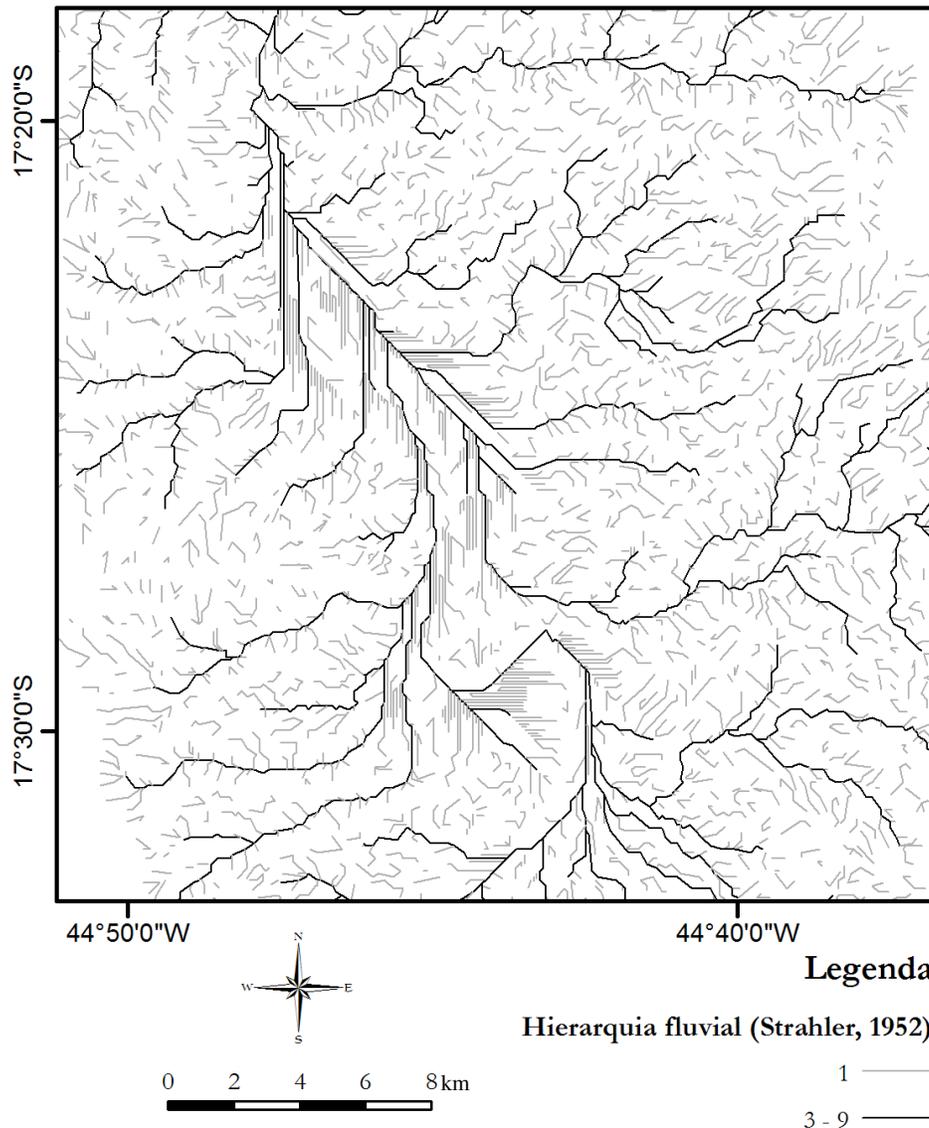


Figura 6.9 – Canais de primeira ordem gerados erroneamente ao longo de canais com largura superior a resolução do MDE-krigado (30 metros): acúmulo de canais alinhados ao longo do vale do médio curso do rio das Velhas.

Uma outra desconformidade da rede de drenagem gerada a partir do MDE-krigado está relacionada à geração de canais de primeira ordem nas cabeceiras. São verificados dois problemas dessa natureza. O primeiro é a formação de canais de primeira ordem em segmentos que na imagem original não existem, mesmo aplicando o mesmo limiar (área necessária para formação de canais) utilizado no MDE-original. Isso se deve ao fato de que, ao aumentar a resolução do MDE-original, a área representada por um pixel passa a ser

representada por 9 pixels. Esse fato permite que as áreas de contribuição de uma dada cabeceira de drenagem seja melhor delimitada, como pode ser observado na Figura 6.3 (b). Outro problema observado nessas porções do relevo corresponde a uma inconsistência do MDE-krigado.

Em algumas cabeceiras, observam-se ramificações nos canais de primeira ordem, as quais são responsáveis pelo aumento indevido da hierarquia e da magnitude da rede de drenagem, mascarando o comprimento e o número de canais de primeira e segunda ordem. Como esses atributos dos canais fluviais permitem interpretações sobre a evolução do relevo e sua dinâmica hidrológica superficial e quando eles são mensurados erroneamente, as interpretações não são corretas. Pode ser dito, portanto, que a rede de drenagem gerada a partir do MDE-original possui o arranjo dos canais consistente, em contrapartida, a rede do MDE-krigado, tem os canais de primeira ordem (de cabeceira) mais curtos e numerosos, conforme ilustrado na Figura 6.10.

Os problemas apresentados acima demonstram que, apesar do MDE-krigado apresentar conformidade com o MDE-original para retratar aspectos tridimensionais do relevo, em contrapartida, a extração da rede de drenagem não apresenta qualidade suficiente para justificar sua implementação. Assim, caso a justificativa para a implementação da interpolação de MDE seja obter uma rede de drenagem com melhor resolução, a metodologia é desaconselhada, devendo ser dada preferência aos dados originais. Como pode ser observado na Figura 6.10, as diferenças entre as redes de drenagem obtidas de MDEs e de dados cartográficos são expressivas para a escala cartográfica 1:50.000. O arranjo da rede de drenagem obtida de MDEs é mais linear e apresenta um grau de detalhamento inconsistente com o esperado, tendo como referência a rede de drenagem das cartas topográficas. Assim, deve-se dar preferência aos dados cartográficos. Essa escolha pode ser feita para a área de estudo deste trabalho, por essa estar mapeada na mesma escala e com a mesma metodologia de foto-interpretação dos cursos d'água.

A rede de drenagem vetorial obtida das cartas topográficas de mesma escala cartográfica e com mesma metodologia de foto-interpretação possibilita análises morfológicas mais precisas. Entretanto, demanda correção topológica de seus vetores, para gerar uma rede de drenagem morfológica e hidrológicamente consistente, conforme ilustrado na Figura 6.10(c). Então, pode-se concluir que a rede de drenagem com prioridade de uso é a obtida

de cartas topográficas, seguida da gerada a partir de MDE-SRTM original, sendo desaconselhado o uso de outros MDEs interpolados de MDE-SRTM devido aos problemas apresentados.

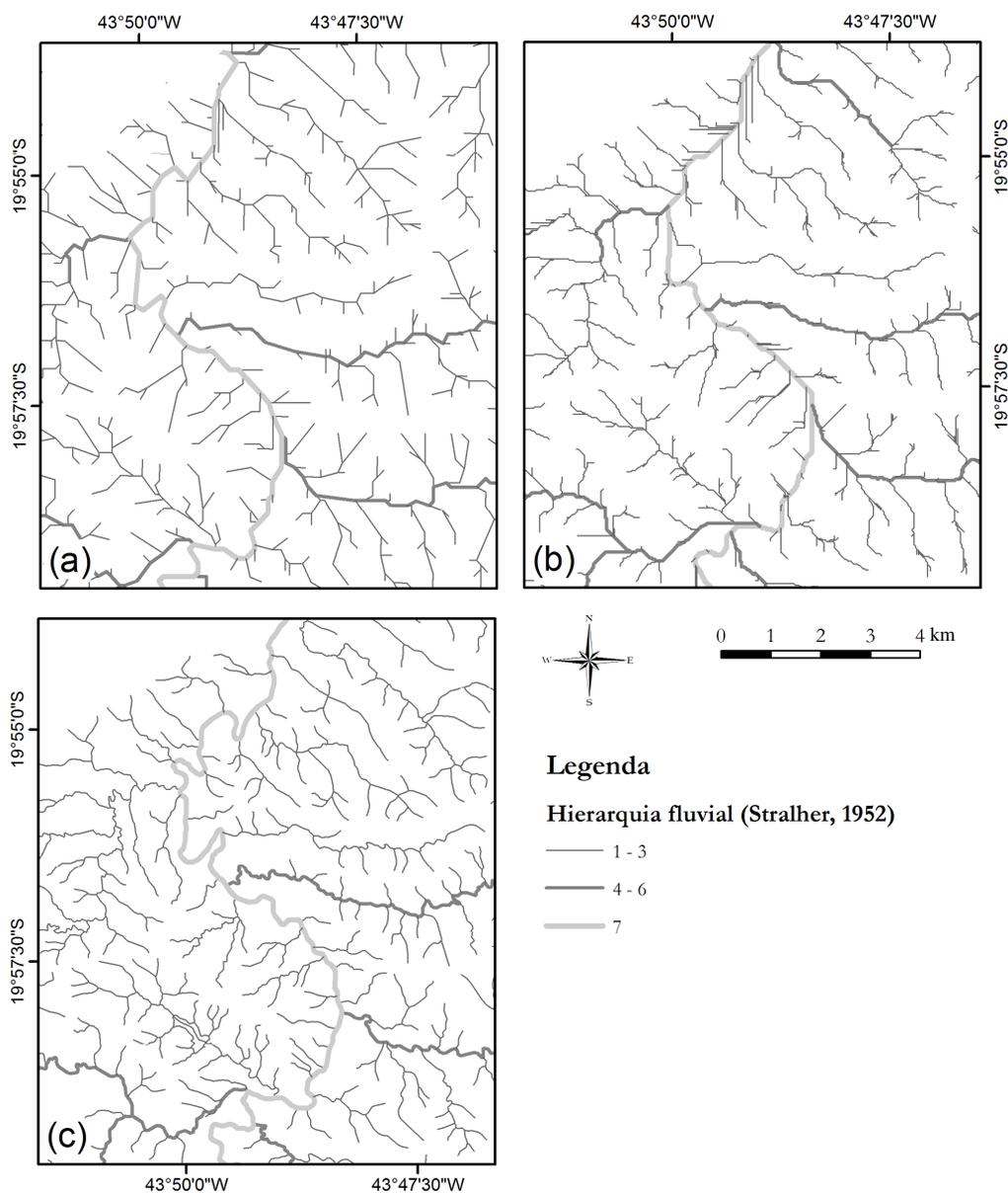


Figura 6.10 – Comparação das redes de drenagem geradas a partir de (a) MDE-original, (b) MDE-krigado, (c) extraída de carta topográfica em escala de 1:50.000.

A diferença na hierarquização dos canais que integram a bacia do alto Rio das Velhas, para os MDEs, faz com que a organização de suas sub-bacias não obedeça o padrão encontrado

nas bacias delimitadas ao utilizar a carta topográfica digitalizada. Essa heterogeneidade visual observada entre as três redes de drenagem é confirmada pela comparação entre os parâmetros morfométricos extraídos para cada um dos conjuntos de dados correspondentes. Os valores esperados para a relação de bifurcação (Rb), a relação do comprimento médio dos canais de cada ordem (Lm), o índice de relação entre o comprimento médio dos canais e a relação de bifurcação (Rlm) e a relação entre as áreas médias das bacias de cada ordem (RA) deveriam ser iguais, para representar com consistência o comportamento padrão de uma bacia hidrográfica conforme apresentado por Horton (1945). Entretanto, em todos esses parâmetros, apenas os gerados a partir dos dados obtidos da rede de drenagem das cartas topográficas apresentaram o comportamento esperado, variando pouco em torno da média, conforme ilustrado na Figura 6.11.

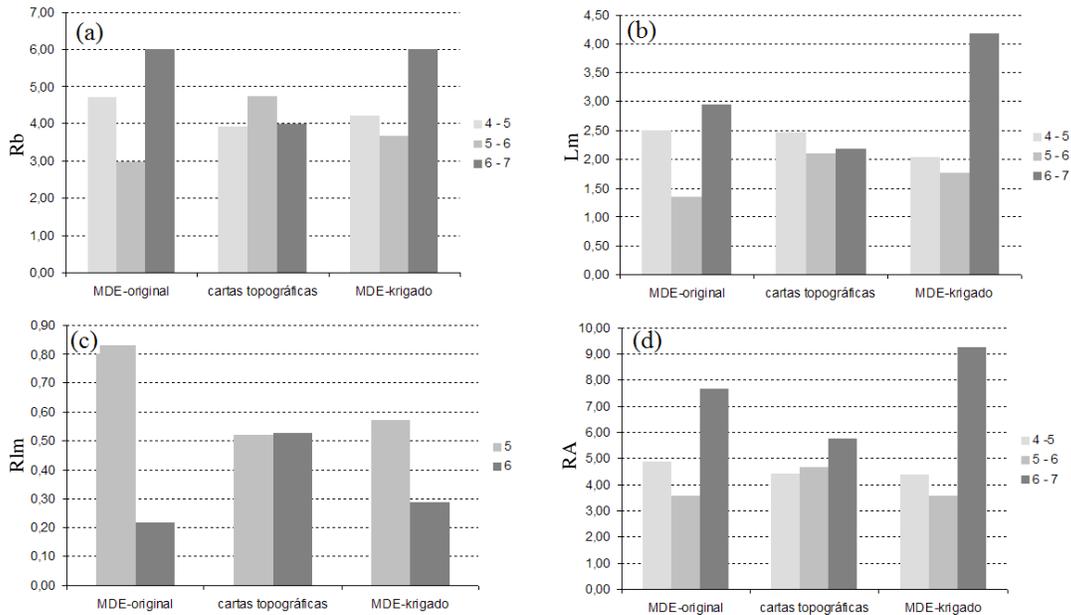


Figura 6.11 – Gráficos comparativos dos valores de (a) Rb , (b) Lm , (c) Rlm e (d) RA para as redes de drenagem geradas a partir de MDE-original, cartas topográficas e MDE-krigado.

O Rb (índice de bifurcação) calculado para as três bases de dados demonstra que a composição da rede de drenagem nos MDEs original e krigado não apresenta uma distribuição constante, sendo que os valores calculados se distanciam da média (4,57 para o MDE-original e 4,63 para o MDE-krigado), enquanto os Rb calculados para a rede de drenagem da carta topográfica mantêm-se próximos da média (4,23), conforme ilustrado na Figura 6.11(a). Esse comportamento também é observado para a relação entre o

comprimento médio dos canais de cada ordem (L_m) nas três bases de dados da rede de drenagem. Os valores dos L_m extraídos das folhas topográficas foram os únicos que não se distanciaram da média (2,25), sendo que os valores de ambos MDEs se distanciaram significativamente (2,27 para o MDE-original e 2,66 para o MDE-krigado.), conforme ilustrado na Figura 6.11(b). A relação entre o R_b e o L_m , dada por R/m , apresentou o comportamento correto apenas nas cartas topográficas, sendo a diferença entre os R/m para os MDE superior a 100%, conforme ilustrado na Figura 6.11(c). A RA apresentou um comportamento também anômalo, com destaque à RA entre áreas das médias das bacias de sexta e sétima ordem, que apresentam valores que se distanciam das médias dos respectivos RA (5,4 para o MDE-original; e 5,7 para o MDE-krigado). Esses valores demonstram, em conjunto, que a composição hierárquica da rede de drenagem extraída dos MDEs não é idêntica à rede obtida das folhas topográficas e que, o MDE-krigado não herda a estrutura de composição dos canais e bacias do MDE-original. O que significa que a rede de drenagem para a bacia do alto Rio das Velhas é diferente em cada uma das bases de dados.

Outro parâmetro com resultados que indicam a diferença morfológica entre as redes de drenagens das bases comparadas é o índice de sinuosidade (I_s), pois ele não analisa a estrutura da rede de drenagem, mas sim os atributos individualizados por canal. Esse parâmetro foi calculado para todos os canais de quarta, quinta, sexta e sétima ordem das bases, totalizando 333 valores de I_s . Observa-se que quanto maior a ordem dos canais maior é a diferença entre a sinuosidade observada nos dados cartográficos e nos dados gerados a partir dos MDEs, conforme ilustrado na Figura 6.12. A sinuosidade média de todas as ordens hierárquicas das redes de drenagens geradas dos MDEs, exceto para o canal de sétima ordem do MDE-original, tem valor aproximado à sinuosidade média calculada para os canais de quarta ordem da rede de drenagem das cartas topográficas. Esse fato demonstra duas situações. Primeiramente, demonstra que a rede de drenagem extraída do MDE-original representa a sinuosidade real dos canais apenas a partir do canal de sétima ordem, e, em segundo, demonstra que não há preservação da sinuosidade dos canais quando um MDE é interpolado por krigagem.

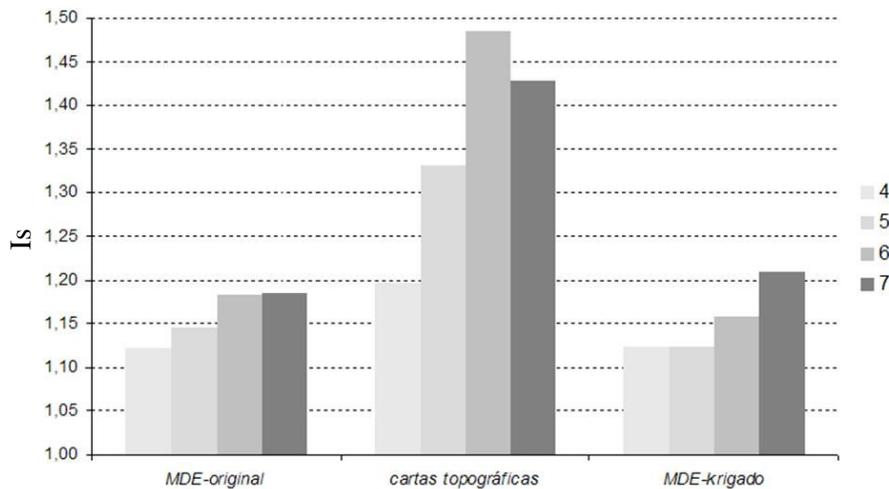


Figura 6.12 – Índice de sinuosidade médio por ordem hierárquica gerados para as redes de drenagem analisadas.

Outra característica mensurada é a o índice de circularidade (I_c). Esse índice apresentou diferenças reduzidas entre as três bases de dados, conforme apresentado na Figura 6.13. Essa variação se deve ao fato da grandeza espacial da bacia (2.250km²) ser compatível a escala cartográfica do polígono da bacia gerado em todas as bases de dados.

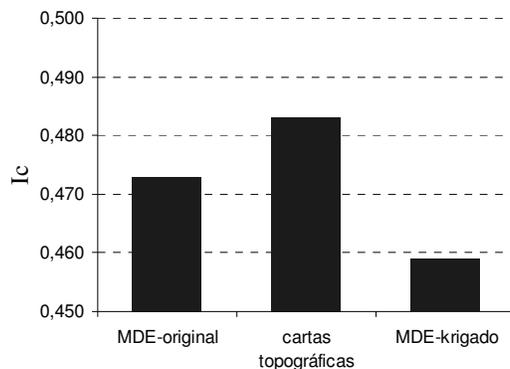


Figura 6.13 – Índice de circularidade (I_c) gerado para a bacia do alto Rio das Velhas nas três bases de dados analisadas.

A densidade de drenagem (D_d) e a densidade hidrográfica (D_h) são outros dois parâmetros utilizados na comparação das três redes de drenagem. Os valores da densidade de drenagem total, na qual são computados todos os canais de todas as ordens hierárquicas, são: 2,33km/km² para o MDE-original; 2,11km/km² para o MDE-krigado; e 2,49km/km² para a base das folhas topográficas. A variação desses valores não está associada a alteração da área da bacia, visto que essa não sobre variação ocasionada pela diferença na resolução espacial dos MDEs e o maior detalhamento morfológico nos limites da bacia (perímetro).

Para comprovar isso, foram demilitadas diversas microbacias. Esse teste demonstra que a alteração dos divisores de água nas micro-bacias, devido ao aumento da resolução do MDE-original para o krigado, influencia com reduzida significância a área de contribuição em micro-bacias. Portanto, a krigagem não altera a área de contribuição a montante de um determinado ponto, permitindo a utilização de um mesmo limiar para geração da rede de drenagem em ambos os modelos sem problemas, conforme ilustrado na Figura 6.14.

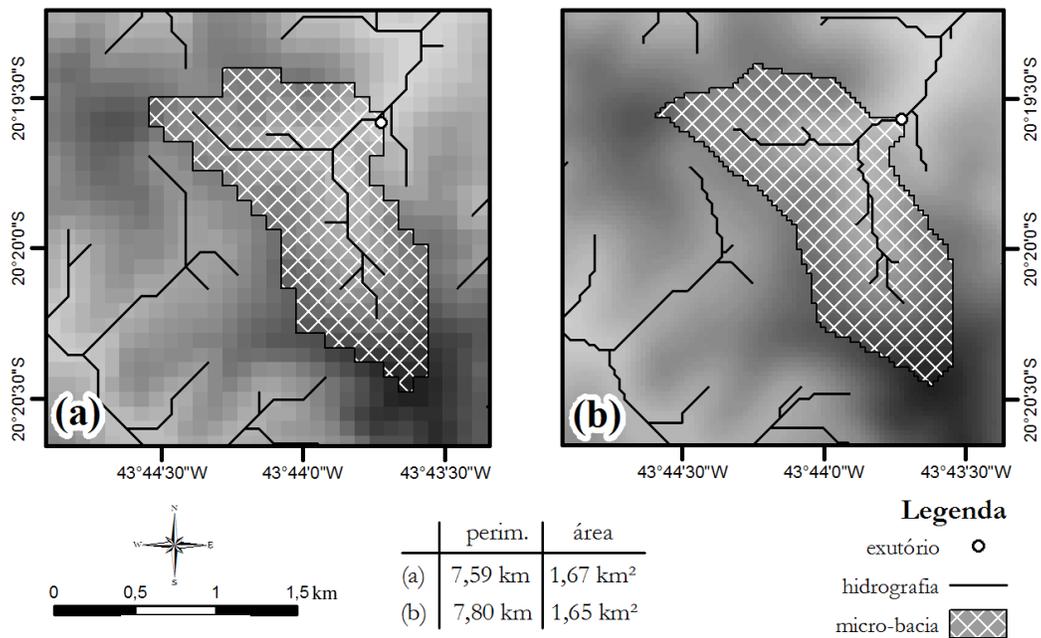


Figura 6.14 – Comparação do perímetro e da área de micro-bacia do alto Ribeirão Carioca gerada automaticamente em (a) MDE-original; (b) MDE-krigado

Assim, a diferença nos valores de Dd , calculados para as três bases de dados e ilustrados na Figura 6.15, pode estar associada a outros fatores que não a composição da rede de drenagem, uma vez que os valores de Dh , ilustrados na Figura 6.16, seguem a mesma estrutura de composição em todos os modelos. Essa diferença está, possivelmente, associada a fatores de aleatoriedade da interpolação geoestatística.

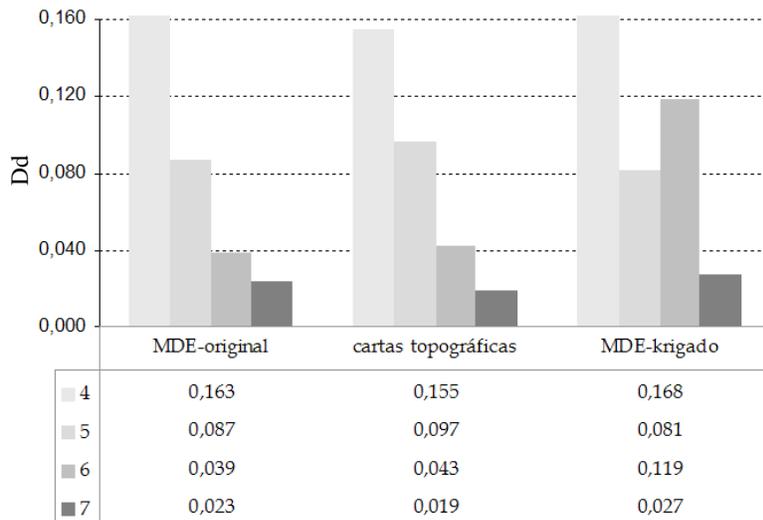


Figura 6.15 – Densidade de drenagem (km/km²) calculada por ordem e total para a bacia do alto Rio das Velhas.

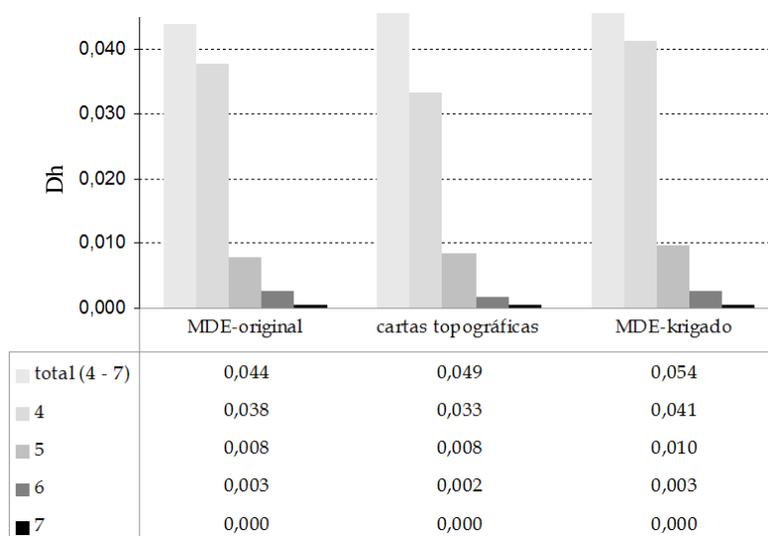


Figura 6.16 – Densidade de rios (rio/km²) calculada por ordem e total para a bacia do alto Rio das Velhas.

A partir desses dados pode ser concluído que a base de dados das folhas topográficas da região é a fonte de dados mais confiável para a realização da análise morfométrica da bacia do alto Rio das Velhas, vistos os problemas apresentados pelas redes de drenagens extraídas tanto do MDE-original quanto do MDE-krigado. Destaca-se que os problemas morfológicos apresentados pela rede de drenagem gerada a partir do MDE-krigado inviabilizam seu uso em qualquer escala de análise, quando a rede de drenagem é objeto de estudo.

7 ANÁLISE MORFOMÉTRICA DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO RIO DAS VELHAS

A bacia hidrográfica do alto Rio das Velhas é uma bacia de sétima ordem, segundo classificação de Strahler (1952), sendo composta por 1 canal de sétima ordem, 4 canais de sexta ordem, 19 canais de quinta ordem, 75 canais de quarta ordem, 333 canais de terceira ordem, 1491 canais de segunda ordem e 6014 canais de primeira ordem. O ordenamento desses canais permite o mapeamento das sub-bacias e a extração de atributos da rede de drenagem e do relevo. A elevada ordem hierárquica dessa bacia impede a derivação de alguns atributos dos canais e bacias de baixa ordem. Assim, as sub-bacias de segunda e primeira ordem não são delimitadas e a declividade e sinuosidade dos canais de terceira, segunda e primeira ordem não são extraídas.

7.1 Análise Individual da Bacia do Alto Rio das Velhas

A partir dos dados iniciais extraídos da base cartográfica (Seção 5.2.2), foram calculados os índices que representam as leis de Horton: relação de área (RA), relação de bifurcação (Rb), relação de gradiente médio por ordem de canal (Rg) e relação de comprimento médio por ordem (Lm). Conforme proposto por Horton (1945), a estrutura desses parâmetros corresponde a regressão linear do logaritmo dos valores das áreas, comprimento médio dos canais por ordem, declividade média dos canais por ordem e número de canais por ordem. Assim, são calculadas as regressões lineares para os valores desses parâmetros para a bacia do alto Rio das Velhas e suas sub-bacias de quinta ordem hierárquica.

Os índices calculados para a bacia do alto Rio das Velhas apresentaram resultados estatisticamente significativos (considerando significância de 95%), demonstrando que essa bacia tem comportamento próximo ao modelo proposto por Horton (1945). Deste modo, a significância estatística corresponde a significância da regressão linear gerada a partir dos parâmetros, segundo Vestana et al. (2006). Os valores desses parâmetros tendem a ser constantes entre as ordens sucessivas, entretanto, são observadas duas anomalias, conforme apresentado na Tabela 7.1 e na Figura 7.1: o Rg dos canais de terceira ordem e o Lm dos canais de primeira ordem. Destaca-se que os valores elevados encontrados para RA e Rg entre os canais de sexta e os de sétima ordem não são anômalos, conforme ilustra a Figura 7.1. Assim, em conjunto, pode ser dito que a bacia do alto Rio das Velhas é uma bacia com

estrutura normal para a rede de drenagem e as sub-bacias, segundo a classificação de Horton (1945).

Tabela 7.1 – Parâmetros que representam as leis de Horton calculados para a bacia do alto Rio das Velhas

<i>Relação entre canais sucessivos</i>	<i>Ra</i>	<i>Rb</i>	<i>Rg</i>	<i>Rlm</i>
1-2	-	4,03	-	1,38
2-3	-	4,48	-	2,46
3-4	4,57	4,44	2,35	2,63
4-5	4,43	3,95	1,46	2,47
5-6	4,35	4,75	1,73	2,06
6-7	6,24	4,00	4,94	2,23
Média	4,90	4,27	2,62	2,20
Desvio Padrão	0,90	0,33	1,59	0,45

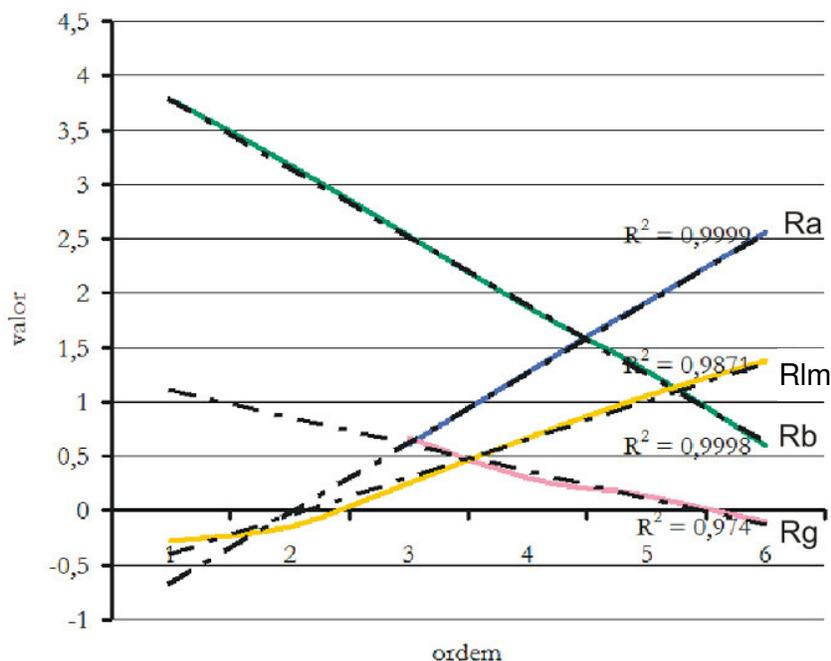


Figura 7.1 – Retas de regressão linear do logaritmo dos parâmetros de Horton calculados para a bacia do alto Rio das Velhas

O gradiente médio de canais esperado para a terceira ordem seria superior ao encontrado, o que significa que esses canais têm declividade média superior ao valor esperado pelo modelo de Horton (1945). Essa anomalia no gradiente de canais pode ser justificada pelo forte controle estrutural da região (ALKIMIM E MARSHAK, 1998). O Lm calculado entre os canais de primeira e segunda ordem apresentou valor superior ao esperado pelo modelo

(2,35), devido ao comprimento médio dos canais de primeira ordem (0,52km) ser bem próximo ao valor dos canais de segunda ordem (0,72km). Essa anomalia também ocorre devido a fatores geológicos. Os canais de primeira ordem que drenam sobre as escarpas dos sinclinais com relevo invertido esculpido nas rochas metassedimentares do Supergrupo Minas (BARBOSA E RODRIGUES, 1967) são canais extensos, bem como os canais que drenam sobre embasamento granito-gnáissico.

7.2 Análise Comparativa das Sub-Bacias de Quinta Ordem da Bacia do Alto Rio das Velhas

Em geral, a bacia do alto Rio das Velhas é uma bacia de sétima ordem, como apresentado anteriormente, e de magnitude 6014, isto é, apresenta 6014 cabeceiras de drenagem. Essa bacia apresenta R/m , Rb , Rg e RA estáveis, estatisticamente significantes (95%), iguais a 2,20; 4,27; 2,62 e 4,90, respectivamente. Quando essa análise tem como unidades básicas as 19 sub-bacias de quinta ordem que integram o alto Velhas, observa-se um comportamento distinto, já que os valores médios da significância dos quatro parâmetros referidos acima ficam abaixo de 95% em 9 das 19 sub-bacias de quinta ordem, conforme apresentado na Figura 7.2. Os parâmetros R/m , Rb , Rg e RA têm um comportamento estatístico significativo. O parâmetro RA apresenta média significativa (98,2%) e reduzido desvio padrão (2,1%) – embora a bacia do Córrego Mingu seja um *outlier*. Esse comportamento, conforme ilustrado na Figura 7.3, permite concluir que esse parâmetro mantém a estabilidade do valor observado para toda a bacia. O parâmetro Rb apresenta significância média ainda mais elevada (98,8%) e desvio padrão mais reduzido (1,2%), não havendo *outliers*. Esse parâmetro, assim como o RA , mantém a estabilidade observada na relação de área calculada para a bacia como um todo.

Em contrapartida, o parâmetro Rg apresenta significância média de 73,6% e o desvio padrão elevado de 34,3%. O comportamento desse parâmetro é consequência do controle estrutural do relevo, responsável pela existência de soleiras geomórficas que possibilitam a formação de canais de menor declividade em áreas de cabeceiras, tendo como exemplo as sub-bacias do Rio do Peixe, que drenam a porção norte do sinclinal da Moeda. O controle estrutural na declividade dos canais influencia, portanto, na menor significância do valor de Rg para a bacia do alto Rio das Velhas em conjunto (97,4%). O R/m médio das bacias de quinta ordem é 80,4%, tendo desvio padrão médio igual a 11,1%. Essa maior estabilidade

dos dados (apresentada na Figura 7.3), embora seja composta por valores individuais de menor significância, demonstra que o comportamento da relação do comprimento médio dos canais (L_m) não apresenta a estrutura esperada por Horton (1945) .

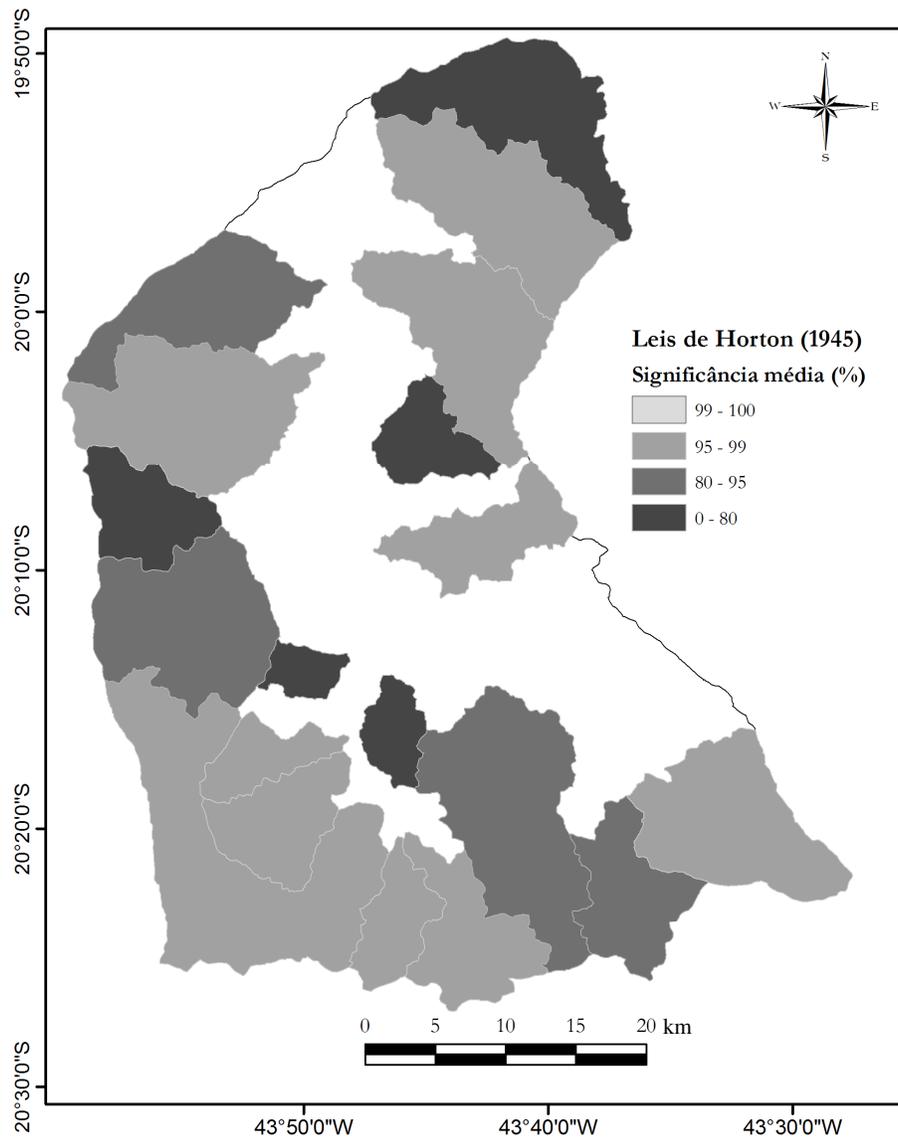


Figura 7.2 – Significância média dos parâmetros que representam as leis de Horton (1945) para as bacias de quinta ordem que integram a bacia do alto Rio das Velhas.



Figura 7.3 – Significância dos parâmetros que representam as leis de Horton (1945) para as bacias de quinta ordem que integram a bacia do alto Rio das Velhas.

O canal do Rio das Velhas apresenta duas ordens hierárquicas: sexta e sétima para os trechos a montante e a jusante da confluência do Rio Itabirito, respectivamente. Esse canal tem sinuosidade média (I_s) igual a 1,54, sendo um canal composto por trechos retilíneos e meandantes intercalados. Essa característica, conforme apresenta Santos (2008) reflete o forte controle estrutural e tectônico da rede de drenagem no Quadrilátero Ferrífero. A bacia tem índice de circularidade igual a 0,48; valor que indica reduzido tempo de concentração com maior possibilidade de cheias. Seus valores de Dd igual a 3,52km/km² e Db igual a 2,48 rios/km² indicam que a bacia apresenta baixa capacidade de gerar novos canais e média capacidade de infiltração. Seu elevado índice de rugosidade (Ir_1) é ocasionado por sua elevada amplitude altimétrica. Essa amplitude, por sua vez, é consequência de serem consideradas as escarpas que limitam a bacia que influenciam a amplitude altimétrica sem terem representatividade espacial, conforme representado na Figura 6.5. Caso essas áreas elevadas sejam desconsideradas, o índice de rugosidade da bacia (Ir_2) assume o valor de 305, conforme apresentado na Tabela 7.2. Esse valor é o mesmo valor encontrado para as sub-bacias de quinta ordem do Ribeirão Caeté, Ribeirão da Prata, Córrego Mutuca e Ribeirão Macacos e Córrego Manso, conforme ilustrado na Figura 7.4.

Tabela 7.2 – Parâmetros calculados para a bacia do alto Rio das Velhas

<i>Parâmetros</i>	<i>Unidade</i>	<i>Valor calculado</i>
H	-	7°
M	-	6014
Lm – médio	-	2,20
Rb – médio	-	4,27
Rg – médio	-	2,62
RA - médio	-	4,90
I_s	-	1,54
I_c	-	0,48
Dr	rio/km ²	3,52
Dd	km/km ²	2,48
Cm	m ²	402,47
Ch	-	Vide Figura 6.5
Ir_1	-	462,84
Ir_2	-	304,17
$\Delta alt.1$	m	1150,00
$\Delta alt.2$	m	750,00

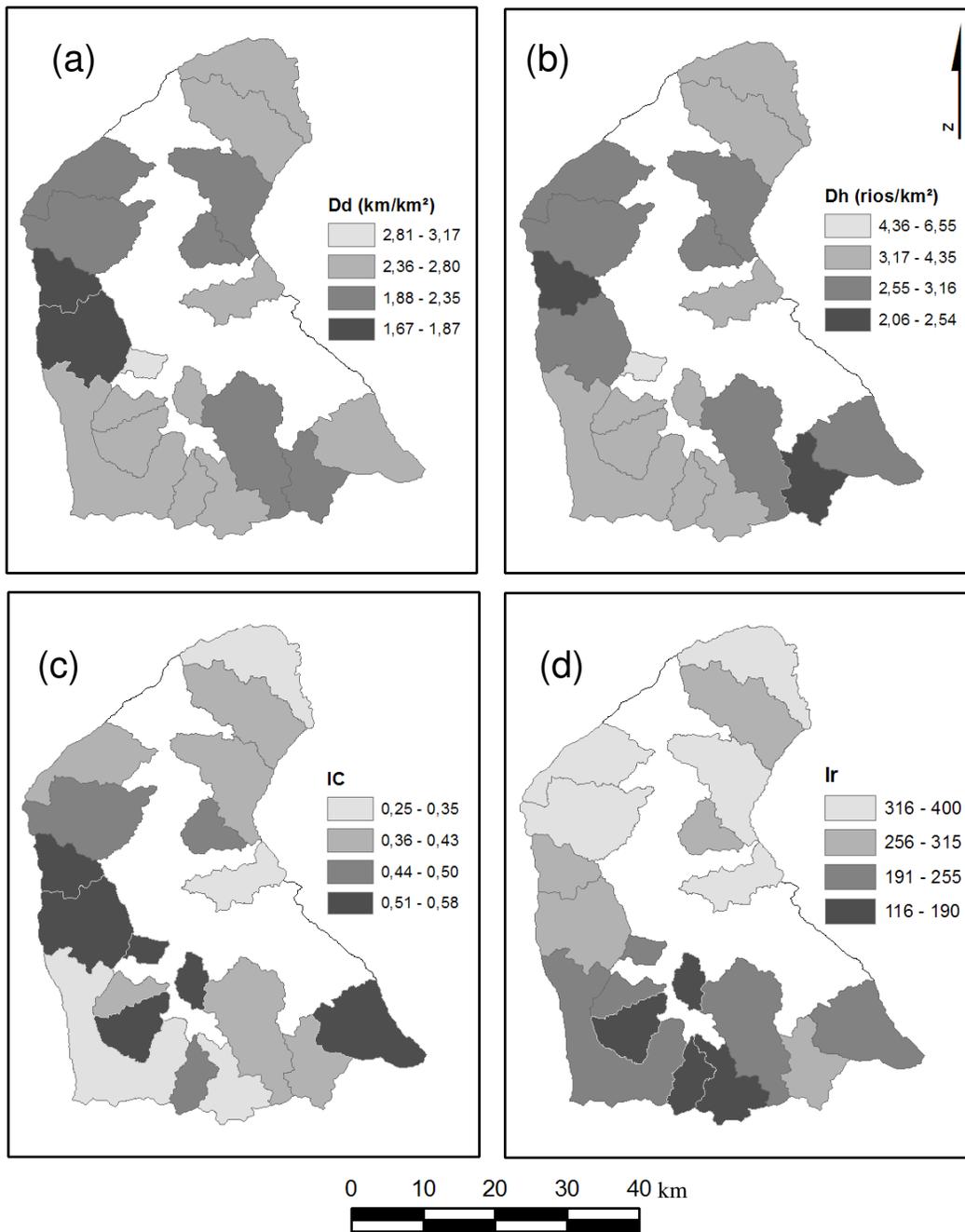


Figura 7.4 – Classificação das sub-bacias de quinta ordem para a (a) Densidade de drenagem, (b) Densidade hidrográfica, (c) Índice de circularidade e (d) Índice de rugosidade – agrupamentos definidos por quebra natural.

O índice de sinuosidade média de um canal (I_s) generaliza as variações de trechos meandantes e retilíneos de um mesmo canal. Assim, caso um canal seja composto por um

trecho fortemente meandrante, mas seus demais trechos sejam retilíneos, esse índice tenderá a fornecer um valor próximo à unidade. Mesmo sendo essa generalização característica do I_s , esse índice representa muito bem o aumento da sinuosidade dos canais a medida que há o aumento da ordem hierárquica, conforme pode ser observado na Tabela 7.3. Em geral, os canais de quarta ordem tendem a ser canais sinuosos ($I_s=1,20$), sendo que os canais de quarta ordem com extensão superior a 6 km são canais com I_s iguais a 1,25 e, portanto, classificados como canais de alta sinuosidade à meandrantés. Os canais de quinta e sexta ordem são todos sinuosos e meandrantés, uma vez que os canais classificados como sinuosos apresentam vários trechos meandrantés. Isto pode ser observado na Figura 7.5(b).

Tabela 7.3 – Índice de sinuosidade média de canal (I_s) por valor médio de ordem

<i>Ordem</i>	<i>Sinuosidade Média (I_s)</i>
4	1,20
5	1,33
6	1,48

O sinclinal do Complexo da Serra da Moeda é drenado por três canais principais de quinta ordem: os dois afluentes do Rio dos Peixes e o Ribeirão do Silva. Esses canais são sinuosos ($I_s=1,40$ e 1,35, respectivamente) e apresentam baixa declividade nos trechos que seguem o eixo de deformação da sinclinal, sendo 1,16m/km para o Rio dos Peixes e 0,69 para o Ribeirão do Silva. Já os afluentes da margem direita do rio das Velhas são, em sua maioria, canais sinuosos com declividade inferior a 4m/km, conforme apresentado na Figura 7.5.

O médio e baixo curso do Rio Maracujá – de quinta ordem hierárquica – apresenta um comportamento diferente dos demais canais de mesma ordem. É um canal retilíneo ($I_s=1,24$), embora seja o canal com a segunda menor declividade de toda a bacia (0,26m/km), sendo mais elevado apenas que o trecho do Rio das Velhas a jusante da confluência com o Rio Itabirito, cuja declividade média é igual a 0,37m/km e I_s igual a 0,37. As sub-bacias de quinta ordem da porção setentrional da bacia do alto Rio das Velhas correspondem a áreas de relevo mais movimentado e rede de drenagem mais encaixada e apresentam os valores mais elevados do índice de rugosidade (I_r), conforme ilustrado na Figura 7.4, valores de declividade média e máxima da bacia e dos canais mais elevados se comparados à porção meridional (sul) da bacia, conforme apresentado na Figura 7.5 (c).

Observa-se também que essas sub-bacias podem ser agrupadas em outras duas classes secundárias: as que são afluentes diretas do rio das Velhas e as que deságuam em afluentes desse rio. O conjunto de sub-bacias que apresenta o comportamento mais homogêneo é o grupo de sub-bacias afluentes do Rio Itabirito, tanto as que drenam sobre o Sinclinal Moeda quanto as que drenam sobre o granito-gnaisse.

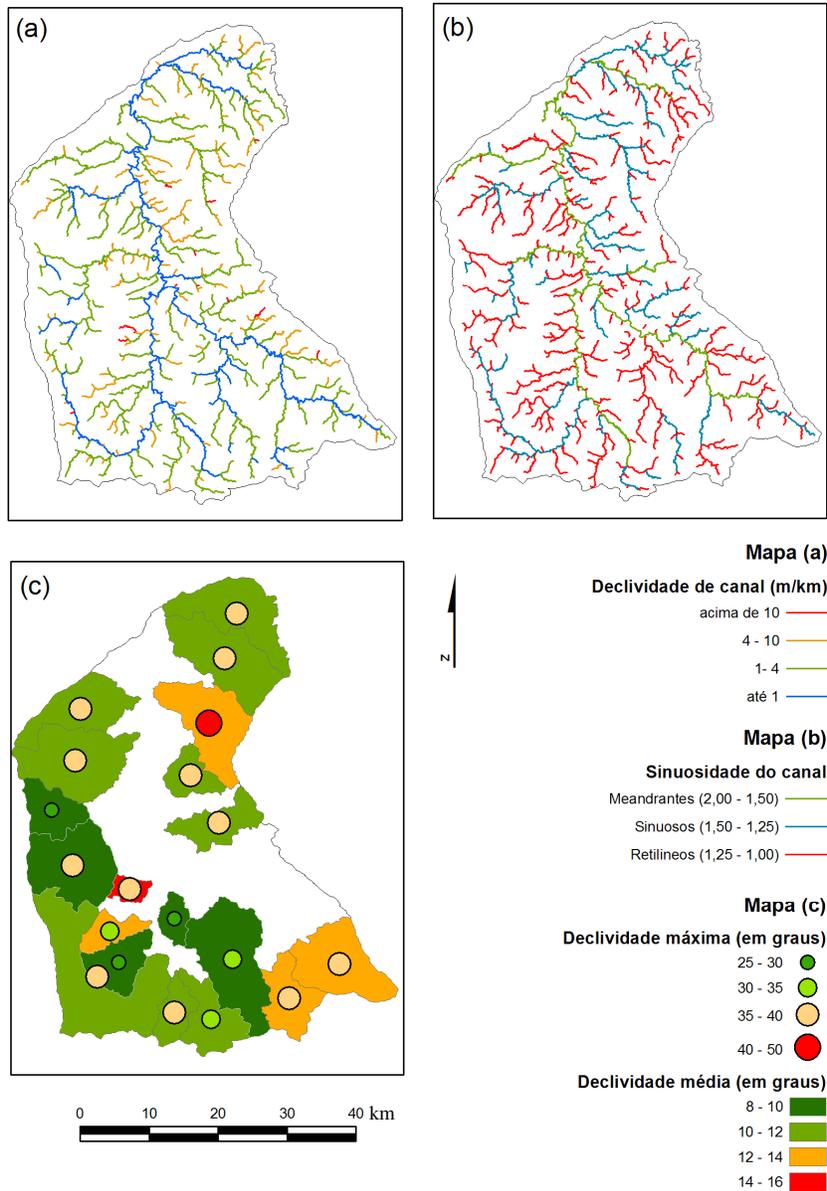


Figura 7.5 – Mapas de (a) sinuosidade média, (b) declividade média dos canais de quarta ordem e ordens superiores e (c) declividade média e máxima das bacias de quinta ordem hierárquica que integram a bacia do alto Rio das Velhas.

7.3 Compartimentação Morfométrica da Bacia do Alto Rio das Velhas

As características das bacias de quinta ordem da bacia do alto Rio das Velhas permitem que essa bacia seja dividida em quatro compartimentos espaciais, conforme apresentado na Figura 7.6 e descrito a seguir:

- SE – bacia do alto Rio das Velhas até a confluência com o rio Itabirito. Apresenta baixos valores para o índice de rugosidade (I_r), densidade de drenagem (D_d) e densidade hidrográfica (D_h). A declividade média e máxima de suas sub-bacias segue a mesma tendência, isto é, quando a declividade média da bacia é elevada, a declividade máxima também é, e o mesmo ocorre para as bacias com declividades mais baixas.
- SW – bacia do Rio Itabirito. Apresenta baixos valores para o índice de rugosidade (I_r) e valores elevados e homogêneos para a densidade de drenagem (D_d) e densidade hidrográfica (D_h). A declividade média é relativamente menor do que a máxima, não apresentando a mesma estabilidade que o agrupamento anterior. A significância dos valores de R_A , R_b , R_g e L_m é homogênea e elevada (acima de 95%) para todas as sub-bacias desse agrupamento.
- NW – afluentes da margem esquerda do Rio das Velhas. Apresenta valores elevados para o I_r e baixos para D_d e D_h . As declividades média e máxima têm o mesmo comportamento do agrupamento SW, com declividades médias mais baixas e máximas mais elevadas. A significância de R_g é reduzida, indicando anomalia na declividade dos canais e a significância de L_m é heterogênea.
- NE – afluentes da margem direita do Rio das Velhas. Apresenta valores elevados para I_r e médios para D_d e D_h . As declividades média e máxima apresentam o mesmo padrão de SW e NW, embora seja mais homogêneo entre suas sub-bacias. A significância de R_g de suas sub-bacias é heterogênea e de L_m é média.

Certamente esta compartimentação reflete condicionantes geológicos de caráter litológico, estrutural e tectônico, em intensidades de combinações diferenciadas. Estudos anteriores levantaram indícios geomorfológicos da movimentação diferencial de blocos na bacia do

alto Rio das Velhas (MAGALHÃES e SAADI, 1994). Não é o objetivo deste trabalho aprofundar nesta linha de investigações, mas os resultados podem abrir frentes para futuras pesquisas sobre as peculiaridades de cada compartimento morfométrico.

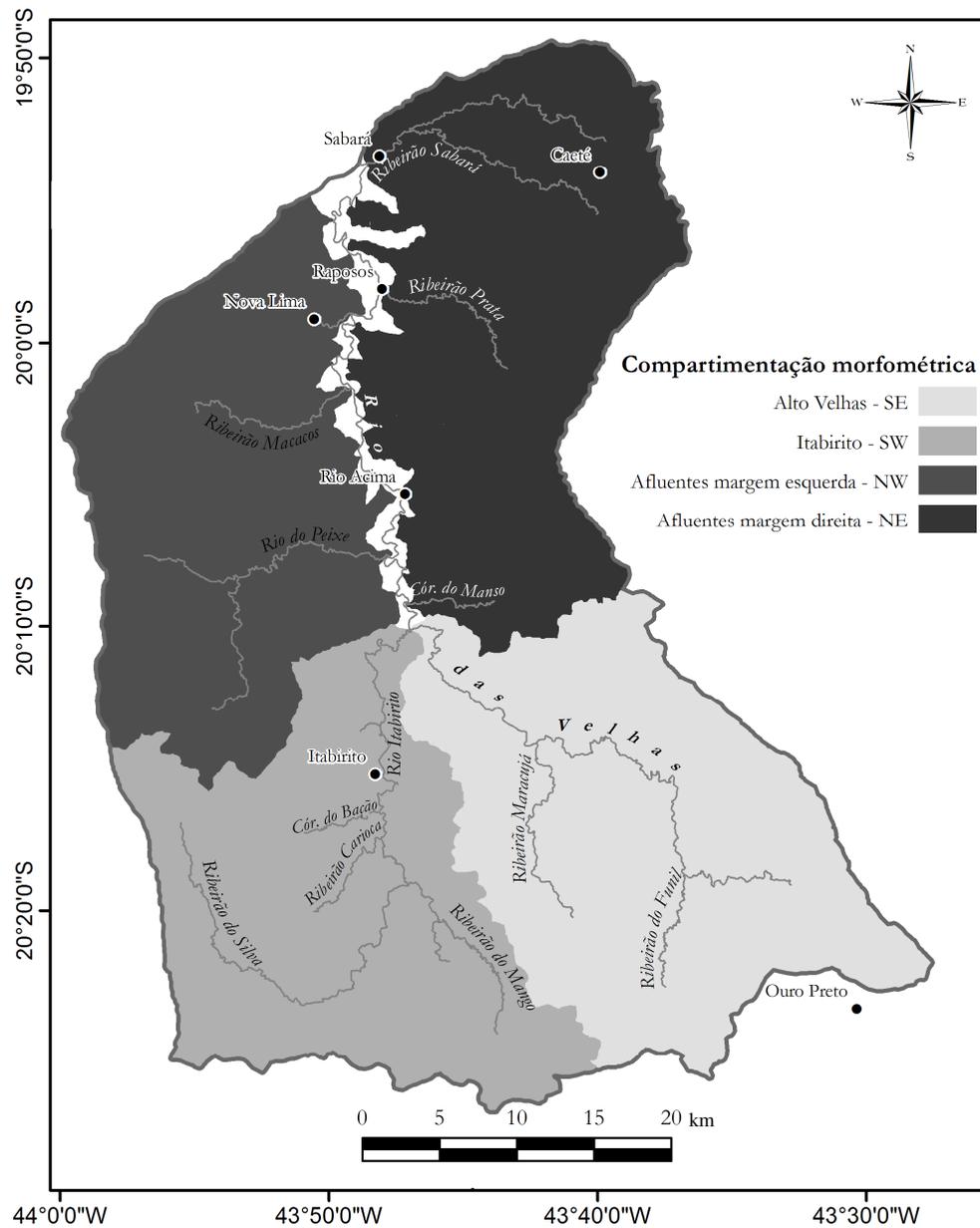


Figura 7.6 – Compartimentação morfométrica da bacia do Alto Rio das Velhas

A compartimentação morfométrica ilustrada na Figura 7.6, tem sua validade testada em relação ao comportamento das bacias que drenam sobre o Complexo do Bação. Esse teste,

conforme indicado na Figura 7.7, demonstra que, de fato, há distinção morfométrica, conseqüentemente, morfológica, entre as bacias de leste e oeste do Complexo do Bação.

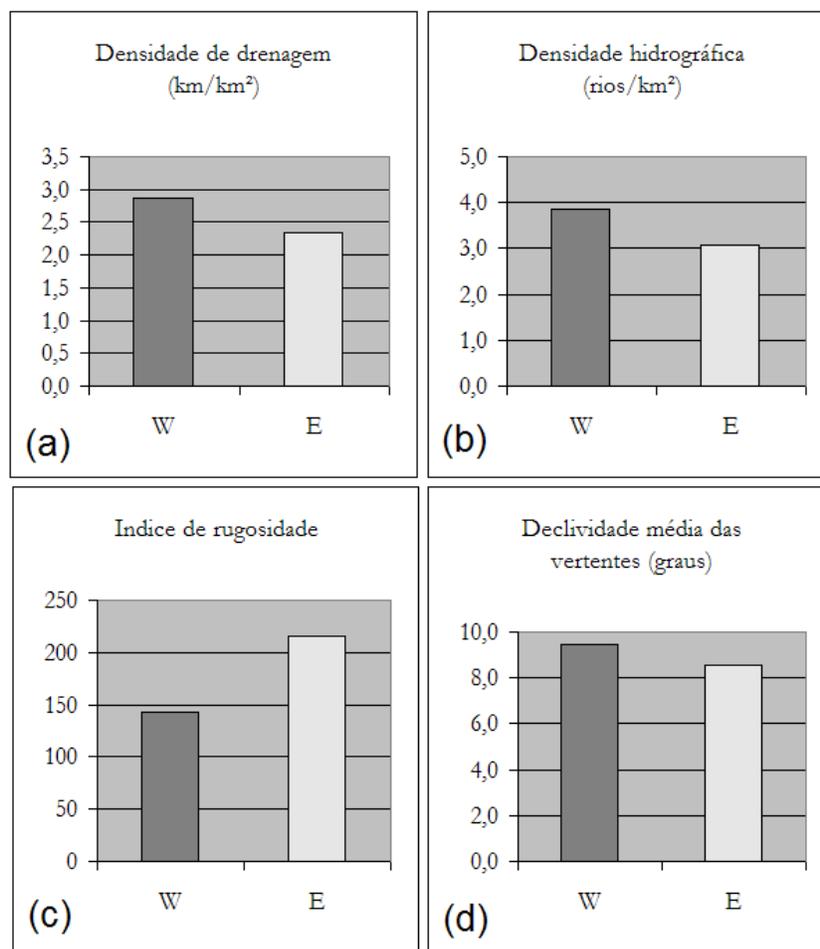


Figura 7.7 – Comparação dos parâmetros morfométricos gerados os compartimentos morfométricos que drenam o Complexo do Bação: (a) densidade de drenagem; (b) densidade hidrográfica, (c) índice de rugosidade, (d) declividade média das vertentes.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise morfométrica da bacia do alto Rio das Velhas possibilita a avaliação da consistência morfológica e hidrológica dos MDEs-SRTM original e interpolado (krigado) da região e a compartimentação da bacia em grupos de sub-bacias com características homogêneas, os quais fornecem subsídios para futuros estudos geomorfológicos e ambientais desenvolvidos na região.

Os MDEs apresentaram resultados favoráveis ao seu uso em estudos que envolvam a análise e a modelagem do relevo, entretanto, as limitações na representação da rede de drenagem impossibilitam o uso em análises desse elemento. O MDE-original representa muito bem a morfologia e a hidrologia do relevo, conforme corrobora a literatura nacional e internacional. Entretanto, sua capacidade de representar a morfologia da rede de drenagem na escala estudada (1:50.000) impossibilita seu uso em análises e simulações hidrológicas, conforme resultados apresentados na Seção 6. Em contrapartida, quando a área representada é em maior escala de análise geográfica, o MDE-original representa com consistência morfológica a rede de drenagem, uma vez que em canais de ordem hierárquica mais elevada os meandros são captados pelo sistema de radar da SRTM.

A interpolação geoestatística por krigagem do MDE-original gera um MDE com elevada semelhança altimétrica e morfológica, devido ao fato do interpolador considerar a estrutura espacial dos dados. Assim, a krigagem é um método geoestatístico, o qual, quando aplicado a dados altimétricos, possibilita a conservação das características primárias (altimetria) e secundárias (declividade, aspecto e comprimento de vertente) do relevo, isto é, o método possibilita a conservação da morfologia. Esse método, entretanto, apresenta limitações na derivação da rede de drenagem, por não manter as características do MDE-original, conforme resultados apresentados na Seção 6. Assim, embora o MDE-krigado tenha consistência morfológica e hidrológica em representar o relevo, sua consistência morfológica da rede de drenagem é reduzida, fato que inviabiliza seu uso em análises que envolvem a rede de drenagem.

O fato de a área de estudo ser representada por um conjunto de folhas topográficas e ter a rede de drenagem fotointerpretada pela mesma instituição (IBGE) possibilita a comparação dos MDEs-original e krigado a esse conjunto de dados cartográficos. Nessa comparação,

constata-se que as folhas topográficas são as melhores fontes para subsidiar análises morfométricas e que a rede de drenagem dessas cartas deve ser considerada nos estudos hidrológicos que simulam a vazão. Uma das opções é gerar uma matriz de mesma resolução espacial que a do MDE utilizado, na qual é impressa a sinuosidade da rede de drenagem. Esse fato pode permitir que o tempo de permanência da água em cada célula seja mais próximo da realidade.

A análise morfométrica realizada para a bacia do alto Rio das Velhas, apresentada na Seção 7, permite confirmar a classificação do relevo da bacia em terras baixas, médias e altas apresentada inicialmente por Hader e Chamberlin (1915), fato diretamente associado ao condicionamento geológico regional. A identificação de grupos de bacias de quinta ordem demonstra a existência de dois comportamentos hidrográficos distintos para as bacias que drenam sobre o granito-gnaiss da região: um agrupamento ocidental (bacias afluentes do Rio Itabirito) e outro oriental (bacia do Rio Maracujá). As causas e implicações dessa distinção não é aprofundada nessa pesquisa e, podendo, portanto, abrir frente para novos estudos.

Os resultados apresentados para a análise morfométrica indicam que a análise de uma bacia que drena sobre litologias variadas, o que é o caso da bacia do alto Rio das Velhas, generaliza a diversidade dos valores encontrados em suas sub-bacias, as quais drenam sobre um substrato rochoso mais homogêneo. Assim, devem ser feitas análises sobre as sub-bacias que integram a área. A análise morfométrica das 19 sub-bacias de quinta ordem hierárquica da bacia do Alto Rio das Velhas fornece subsídios para o ordenamento espacial, ambiental ou territorial da bacia do alto Rio das Velhas, seguindo a linha apresentada por Santos e Sobreira (2007) – que apresenta unidades territoriais básicas como subsídio ao ordenamento territorial na região – e considerando os resultados das pesquisas desenvolvidas nessa bacia.

Os resultados apresentados para a bacia do alto Rio das Velhas podem ser interpretados à luz de outras pesquisas realizadas na bacia do alto Rio das Velhas (SANTOS, 2008) possibilitando interpretações mais precisas sobre o comportamento de suas águas superficiais. Os resultados obtidos para a análise dos MDEs e suas redes de drenagem são pertinentes para a escala de análise regional, sendo recomendados estudos do comportamento da rede de drenagem gerada a partir de MDEs em outras escalas de análise.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCÂNTARA, E. H.; AMORIM, A. J. Análise morfométrica de uma bacia hidrográfica costeira: um estudo de caso. **Caminhos de Geografia**. Uberlândia:UFU v.7, n.14, p.70-77, fev. 2005.

ALKMIM F. F.; MARSHAK S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Cráton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, v. 90; p. 29-98. 1998.

ALVES, J. M. P.; CASTRO, P. T. A. Influência das feições geológicas na morfologia da bacia do rio do Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 117-124, 2003.

ARAÚJO, E. P. **Aplicação de dados SRTM à modelagem da erosão em microbacias por geoprocessamento**. 2006. 88p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). INPE: São José dos Campos, 2006.

BACELLAR, L. A. P. **Condicionantes geológicos, geomorfológicos e geotécnicos dos mecanismos de voçorocamento na bacia do rio Maracujá - Ouro Preto, MG**. 2000. 226p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro: Rio de Janeiro, 2000.

BARBOSA G. V. Superfícies de Erosão no Quadrilátero Ferrífero. São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v.10, n. 1, p. 89-101, 1980.

BARBOSA G. V. & RODRIGUES D. M. S. **Quadrilátero Ferrífero**. Belo Horizonte, IGC/UFMG. 1967. 130p.

BROOKER, P. I. Kriging. **Enginery and Mining Journal**. v.180, n.9, p.148-153, 1979.

BUBENICECK, L.; HAAS, A. Method of calculation of the iron ore reserves in the Lorraine deposit. In: **The decade of digital computing in the mineral industry**. Nova York: The American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. p.179-210, 1969.

BURGUESS, P. I.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I: The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science.**, v. 31, p.315-331, 1980.

CAVALCANTI, A. P. B.; RODRIGUEZ, J. M. M. O Meio Ambiente: histórico e contextualização. IN: CAVALCANTI, Augustinho P.B.(coord.). **Desenvolvimento Sustentável e Planejamento: bases teóricas e conceituais**. Fortaleza: Imprensa Universitária/UFC, 1997.

CHAUDHRY, O.; MACKANESS, W. Automatic identification of Hills and Ranges using Morphometric Analysis. IN: GISRUK 2007 - Geographical Information Science Research

Conference. 2007. NUI Maynooth, Ireland: National Centre for Geocomputation of United Kingdom. **Proceedings...** 10p, 2007.

CHORLEY, R. J. **Geomorphology and general systems theory**. USGS, Professional paper 500 B, 1962. (tradução em *Notícia Geomorfológica*, v. 22, n. 23, 1971. p. 3-22)

CHORLEY, R. J.; KENNEDY, B. A. **Physical geography: a systems approach**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1971.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise morfométrica das bacias hidrográficas do Planalto de Poços de Caldas**. 1970. 215p. Tese (Livre Docência). Faculdade de Filosofia, Universidade Estadual de São Paulo, Rio Claro, 1970.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980, 186p.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1999, 186p.

COELHO NETO, A. L. Aplicações de geoprocessamento em bacias de médio e grande porte. IN: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13. 2007. Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos:INPE, 2007, p.2437-2445.

COSTA, T. C. C.; SANTOS, P. R. A.; GUIMARÃES, S. P. **Extração de variáveis topográficas do modelo digital de elevação SRTM para o estado do Rio de Janeiro**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2005, 23p.

COSTA-CABRAL, M. C.; BURGESS, S. J. Sensitivity of channel network planform laws and the question of topologic randomness. **Water Resources Research**. Washington:American Geophysical Union. v.33, n.9, p.2179-2197, set. 1997.

CUNHA, C. M. L.; MENDES, I. A. Proposta de análise integrada dos elementos físicos da paisagem: uma abordagem geomorfológica. **Estudos Geográficos**. Rio Claro: UNESP, v.3, n.1, p.111-120, jan-jun, 2005.

CURKENDALL, D.W.; FIELDING, E.J.; CHENG, T. POHL, J.M. A computational-grid based system form continental drainage network extraction using SRTM digital elevation models. IN: International Conference on Parallel Processing Workshop, 2003 (ICPPW'03). **Proceedings...** 2003. p.181.

DAVID, M. **Geostatistical ore reserve estimation**. New York, Elsevier, 364p, 1977.

DE NARDIN, D.; ROBAINA, L. E. S. Mapeamento geomorfológico da bacia hidrográfica do arroio Miracatu, oeste do estado do Rio Grande do Sul. IN: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 6. 2006. Goiânia. **Anais...** Goiânia:UFGO, 2006. 10p.

DRÂGUF, L.; BLASCHKE, T. Automated classification of land form elements using objet-based image analysis. **Geomorphology**. Elsevier, v. 81, p. 330-344, 2006.

DUARTE, G. G. F.; ASSAD, M. L. L. Avaliação de MDE obtidos por meio de SRTM. IN: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13. 2007. Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos:INPE, 2007. p.4849-4855.

DUTRA, L.; MOURA, A.C.M.; FREITAS, C.R.; FREITAS, C.; GUIMARÃES, R.J.; DRUMMOND, S.; AMARAL, R.S.; CARVALHO, O. Uso das imagens SRTM no mapeamento da rede de drenagem e no estudo da rugosidade do terreno em Minas Gerais e suas relações com a ocorrência de esquistossomose. IN Simpósio Nacional de Geografia da Saúde, 2, 2005, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro : FioCruz, 2005. p. 28-30.

FELTRAN FILHO, A. **Contribuição à análise fluviométrica da bacia do rio Piracicaba**. 1982. 188 p. Dissertação (Mestrado). Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 1982.

FELTRAN FILHO, A.; LIMA, E. F. Considerações morfométricas da bacia do rio Uberabinha – Minas Gerais. **Sociedade E Natureza**. Uberlândia:UFU. v. 19. n. 1, p.65-80, jun. 2007.

FLORENZANO, T. G. Geotecnologias na Geografia Física Aplicada: difusão e acesso. **Revista do Departamento de Geografia**. n. 17. São Paulo:USP, p. 24-29, 2005.

FREITAS, C. R.; MOURA, A. C. M.; MELO, G. R.; DUTRA, L. Aproveitamento do potencial de imagens SRTM na geração de produtos de comunicação e na atualização de mapa de drenagem para o estado de Minas Gerais, Brasil. IN: Congreso Geológico Argentino e Simposio Internacional sobre Avances de la Teledetección en Geología, 16. 2005. La Plata: publisher. **Anais ...** 2005. p. 1-10.

GANAS, A.; PAVLIDES, S.; KARASTATHIS, V. DEM-based morphometry of range front escarpments in Attica central Greece, and its relation to fault slip rates. **Geomorphology**. Elsevier, v.65, p. 301-319, 2005.

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

HADER, E. C.; CHAMBERLIN, R. T. The Geology of Central Minas Gerais. **Journal of Geology**. v.23.n.445, p341-424, 1915.

HANCOCK, G. R.; MARTINEZ, C.; EVANS, K. G.; MOLIERE, D. R.. A comparison of SRTM and high-resolution digital elevation models and their use in catchment geomorphology and hydrology. Australian examples. **Earth Surface Processes and Landforms**, Elsevier, 31, p.1394–1412, 2006.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrographical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v.56, n.2, p.275-370, 1945.

HOTT, M. C.; FURTADO, A. L. S. **Metodologia para a determinação automática de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas.** Campinas: EMBRAPA Monitoramento por satélite, 25p, 2004.

HOTT, M. C.; FURTADO, A. L. S.; RIBEIRO, C. A. A. S. Determinação automática de parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas no município de Campinas – SP. IN: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13. 2007. Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos:INPE, 2005. p. 3381-3388.

HUIJBREGTS, C. J. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: Davis, J.C. E McCullagh, M.J. (ed) **Display and anaysis of spatial data.** New York, John Wiley. p.38-53, 1975.

IBGE. DIRETORIA DE GEODÉSIA E CARTOGRAFIA. **Acuruí:** Rio de Janeiro: IBGE, 1977a; 75 x 61 cm; Escala 1:50 000.

IBGE. DIRETORIA DE GEODÉSIA E CARTOGRAFIA. **Belo Horizonte:** Rio de Janeiro: IBGE, 1977b; 72 x 60 cm; Escala 1:50 000.

IBGE. DIRETORIA DE GEODÉSIA E CARTOGRAFIA. **Caeté:** Rio de Janeiro: IBGE, 1977c; 72 x 60 cm; Escala 1:50 000.

IBGE. DIRETORIA DE GEODÉSIA E CARTOGRAFIA. **Itabirito.** Rio de Janeiro: IBGE, 1977d; 74 x 59 cm: Escala 1:50 000.

IBGE. DIRETORIA DE GEODESIA E CARTOGRAFIA. **Mariana.** Rio de Janeiro: IBGE, 1976e; 73 x 59 cm: Escala 1:50,000.

IBGE. DIRETORIA DE GEODÉSIA E CARTOGRAFIA. **Ouro Preto.** Rio de Janeiro: IBGE, 1977f; 73 x 58 cm Escala 1:50 000.

IBGE. DIRETORIA DE GEODÉSIA E CARTOGRAFIA. **Rio Acima.** Rio de Janeiro: IBGE, 1977g; 73 x 58 cm: Escala 1:50 000.

JARVIS, A.; RUBIANO, J.; NELSON, A.; FARROW, A.; MULLIGAN, M. **Practical use of SRTM data in the tropics:** Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data. Cali:Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2004. 33p.

KAMPEL, S. A. **Análise especial para processos geográficos:** a urbanização da Amazônia Brasileira. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo: São Paulo, 2006.

LANA, C. E. **Cartografia integrada de ecossistemas lóticos (fluviais) no alto curso do rio das Velhas, MG.** 2004. Dissertação (Mestrado em Geologia Ambiental e Conservação de Recursos Naturais) Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004

LANA, C. E.; CASTRO, P. T. A. Estudos da proveniência dos sedimentos recentes em um segmento fluvial do alto curso do Rio das Velhas - MG. In: X Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário - ABEQUA, 2005, Guarapari. **Anais...** 2005.

LANA, C. E.; CASTRO, P. T. A. Resposta da rede de drenagem à heterogeneidade geológica em bacias hidrográficas: uma comparação entre bacias do alto Rio das Velhas e Jequitaiá - MG. IN: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 6. 2006. Goiânia. **Anais...** Goiânia:UFGO, 2006, 11p.

LANA, C. E.; ALVES, J. M. de P.; CASTRO, P. T. A. Análise morfométrica da bacia do Rio do Tanque, MG - Brasil. **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 54, n. 2, p. 121-126, 2001.

LATRUBESSE, E. M.; STEVAUX, J. C.; SINHA, R. Tropical Rivers. **Geomorphology**. Elsevier, v. 70, p.187-206, 2005.

LIMA, P.; CÂMARA, G.; QUEIROZ, G. GeoBR: Intercâmbio sintático e semântico de dados espaciais. IN: Simpósio Brasileiro de Geoinformática, 4, 2002, Belo Horizonte. **Anais...** São José dos Campos:INPE, p.139-146, 2002.

LOPES, M. R. S. **Avaliação das taxas de recuo diferencial do divisos Doce-São Francisco na borda leste do Quadrilátero Ferrífero**: aplicação de isótopos cosmogênicos, 2008. Projeto de Tese (Doutorado em Geografia) Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro (no prelo)

MAGALHÃES JR, A. P.; SAADI, A. Ritmos da Dinâmica fluvial Neo-Cenozóica controlados por soerguimento regional e falhamento: o vale do Rio das Velhas na região de Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil. **Geonomos**. Belo Horizonte: IGC-UFMG; v. 2, n. 1, p.42-54, 1994.

MAIO, C. R. Parâmetros geomorfológicos na identificação de áreas homogêneas. **Cadernos de Geociências**, n.5, p.21-52, jul 1990.

MARQUES NETO, R.; VIADANA, A. G. Morfotectônica na bacia do ribeirão Vermelho (São Tomé das Letras): avanços nos estudos neotectônicos no setor meridional do Estado de Minas Gerais. **Estudos Geográficos**. v. 4, n. 1, p.67-77, jun. 2006.

MARTINEZ C.; HANCOCK G. R.; EVANS K. G.; MOLIERE D. R. A catchment based assessment of the 3-Arc second SRTM digital elevation data set. IN: MODSIM 2005 – International Congress on Modelling and Simulation. 2005. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand. **Proceedings...** 2005, p.1409–1415.

MATSUDA, I. River morphology and channel processes. IN: Dooge, J.C.I. (org.), **Fresh surface water**, Oxford: UNESCO, 12p, 2004. Disponível em: <<http://www.eolss.net>>. Acessado em: 20 de março de 2008.

MEDRONHO, R. A; VALENCIA, L. I. O.; FORTES, B. P. M. D.; BRAGA, R. C. C.; RIBEIRO, S. V. Spatial analysis of hepatitis A seroprevalence in children of a poor region

of Duque de Caxias, Rio de Janeiro, Brazil. **Revista Brasileira de Epidemiologia**. São Paulo, v. 6, n. 4, 2003.

MELLO, C. R.; LIMA, J. M.; SILVA, A. M.; MELLO, J.M.; OLIVEIRA, S. M. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**. v. 27. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2006.

MENEZES, P. M. L.; COELHO NETO, A. L. **Escala**: estudo de conceitos e aplicações. Rio de Janeiro: GEOCart-UFRJ, 6p, 2003. Disponível em: <http://www.geocart.igeo.ufrj.br/pdf/trabalhos/Escala_Conceitos_Aplic.pdf>. Acesso em: 19 de maio de 2008.

MILANI, J. R.; CANALI, N. E. O sistema hidrográfico do rio Matinhos: uma análise morfométrica. **Revista RA'EGA**. Curitiba:UFPR, v.4, p. 139-152, 2000.

MILIAREISIS, G. Geomorphometric mapping of Zagros Ranges at regional scale. **Computers and Geosciences**, v.27, n.7, p.715-728, 2001.

MOUSSA, R.; BOCQUILON, C. Fractal analyses of tree-like channel networks from digital elevation model data. **Journal of Hydrology**. Elsevier, v. 187, p.157-172, 1996.

NEVES, M. C.; CÂMARA, G.; MONTEIRO, A. M. Análise exploratória espacial de dados sócio-econômicos de São Paulo. IN: GISBrasil 2000. Salvador. **Anais...** São José dos Campos:INPE, 2000. 11p.

NIKOLAKOPOULOS, K.G.; CHRYSOULAKIS, N. Updating the 1:50.000 topographic maps using ASTER and SRTM DEM - The case of Athens, Greece. IN: Ehlers, M.; MICHEL, U. **Remote sensing for environmental monitoring, GIS applications and Geology IV**, 2006. 11p.

OLIVEIRA, T. A. S.; CASTRO, P. T. A.; BRAGA, S. C. M. Caracterização do sistema fluvial do rio do Carmo, bacia do rio Doce, com base em análises morfométricas sobre mapas topográficos. In: Semana de Iniciação Científica, 15, 2007, Ouro Preto. **Anais...** Ouro Preto:UFOP, 2007.

OPROMOLLA, P. A.; DALBEN, I.; CARDIM, M. Análise da distribuição espacial da hanseníase no Estado de São Paulo, 1991-2002. **Revista Brasileira de Epidemiologia**. São Paulo, v. 8, n. 4, 2005

PARANHOS FILHO, A. C.; FIORI, A. P.; DISPERATI, L.; LUCHESI, C.; CIALI, A.; LASTORIA, G. Avaliação mutitemporal das perdas de solo na bacia do Rio Taquarizinho-Ms. **Boletim Paranaense de Geociências**. n.52, Curitiba:UFPR, p.49-59, 2003.

PINHEIRO, E. S. Comparação entre dados altimétricos SRTM, cartas topográficas e GPS: numa área com relevo escarpado. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.58 v.1. Rio de Janeiro:ABC, 9p, 2006.

- PINTO, A. O. T.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. S.; ARAÚJO NETO, M. D. Tratamento dos dados da missão Shuttle Radar Topography Mission e comparação com modelo digital de terreno gerado por interpolação de cartas topográficas. **Espaço e Geografia**, Brasília:UnB. v. 7. n. 1, p.77-97, 2004.
- PISSARRA, T. C. T.; POLITANO, W.; SILVA, H. R.; Simetria de microbacias de primeira ordem de magnitude na região de Ilha Solteira, SP. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal:UNESP, v.18, n.4, p.123-131, jun. 1999.
- PISSARRA, T. C. T.; POLITANO, W.; FERRAUDO, A. S. Avaliação de características morfométricas na relação solo-superfície da bacia hidrográfica do Córrego Rico, Jaboticabal, S.P.. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, 2004.
- POLITANO, W.; PISSARRA, T. C. T. Relações entre característica morfométricas quantitativas e estimativa da vazão em função da área em microbacias hidrográficas de 2º ordem de magnitude. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal: UNESP. v.23, n.1, p.179-186, jan. 2003.
- RECKZIEGEL, E. W.; ROBAINA, L. E. S. Estudo de parâmetros morfométricos do relevo e da rede de drenagem da área situada entre os rios Jaguari e Ibicuí no município de São Vicente do Sul – RS. IN: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 6. 2006. Goiânia. **Anais...** Goiânia:UFGO, 2006. 11p.
- RIFEEL, S. B. **Curva hipsométrica no mapeamento de paleosuperfícies: abordagem quantitativa**. 2006. 88p. Dissertação. (Mestrado em Geologia Ambiental). Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- RODRIGUES, S. C.; BRITO, J. L. S. Mapeamento geomorfológico de detalhe – uma proposta de associação entre o mapeamento tradicional e as novas técnicas em geoprocessamento. **Caminhos de Geografia**. Uberlândia:UFU v.1, n.1, p.1-6, set. 2000.
- RUBIN, J. C. **Sedimentação quaternária, contexto paleoambiental e interação antrópica nos depósitos aluviais do alto rio Meia-Ponte – Goiás/GO**. Rio Claro, 1999. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1999.
- RUSZKICZAY-RUDIGER, Z. **Tectonic and climatic forcing in Quaternary landscape evolution in the central Pannonian Basin: A quantitative geomorphological geochronological and structural analysis**. 2007. 149p. Tese (Doutorado em Ciências Naturais) Vrije University, Amsterdã, 2007. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/1871/10689>> Acessado em: 20 de março de 2008.
- SALGADO, A. A. R.; BRAUCHER, R.; VARAJÃO, C. A. C.; COLIN, F.; VARAJÃO, A. F. D.; NALINI JUNIOR, H. A. Relief evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Minas Gerais, Brazil) by means of (10Be) cosmogenic nuclei. **Zeitschrift für Geomorphologie** (In Press). 2008a

SALGADO, A. A. R; VARAJÃO, C. A. C.; COLIN, F.; CHEREM, L. F. S., BRUNEL, C.B. **Evolução do relevo das terras altas da alta bacia do Rio das Velhas no Quadrilátero Ferrífero/MG – bacia do rio São Francisco.** (No Prelo). 2008b

SANTOS, G.B. **Geomorfologia fluvial no Alto Vale do Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, MG:** paleoníveis deposicionais e dinâmica erosiva e deposicional atual. 2008. 130p. Dissertação (Mestrado em Geografia e Análise Ambiental) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SANTOS, C. A., SOBREIRA, F. G. Unidades territoriais básicas como subsídio ao ordenamento territorial em Itabirito - MG. IN. Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 12. Natal., 2007. **Anais...** Natal:UFRN, 2007.

SANTOS, C. A.; SOBREIRA, F. G. Análise morfométrica como subsídio ao zoneamento territorial: o caso das bacias do Córrego Carioca, Córrego do Bação e Ribeirão Carioca na região do Alto Rio das Velhas-MG. **Rem: Rev. Esc. Minas**, vol.61, nº1, Jan./Mar. 2008,p.77-85.

SANTA CATARINA. Secretaria de Estado do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente, Secretaria de Estado do Desenvolvimento Rural e da Agricultura. **Zoneamento da disponibilidade e da qualidade hídrica. Plano de gestão e gerenciamento da bacia do rio Araranguá.** Florianópolis : SDM – Instituto Cepa, v. 3, 62p, 1997.

SARRIS, A.; KARAKOUDIS, S.; VIDAKI, C.; SOUPIOS, P. Study of the morphological attributes of Crete through the use of remote sensing techniques. **IASME Transactions.** Athens: IASME, issue 6, v. 2, p.1043-1051, 2005.

SAUCHYN, D. J.; CRUDEN, D. M.; HU, X. Q. Structural control of the morphometry of open rock basins, Kananski region, Canadian Rocky Mountains. **Geomorphology.** Elsevier, v. 22, p.313-324, 1998.

SCHEIDEGGER, A. E. Morphometric analysis and its relation to tectonics in Macaronesia. **Geomorphology.** Elsevier, v.46, p. 96-115, 2002.

SCHOONOVER, J. E.; LOCKABY, B. G.; SHAW, J. N. Channel morphology and sediment origin in streams drainind the Geogia Piemont. **Journal of Hydrology.** Elsevier, v.342, p.110-123, 2007.

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

SHANKAR, U.; PEARSON, C. P.; NIKORA, V. I.; IBBITT, R. P. Heterogeneity in catchment properties: a case study of Grey and Buller catchments, New Zealand. **Hydrology and Earth System Sciences.** Beisin:Elsevier, v.6, n.2, p.167-183, 2002.

SILVA, A. M.; HERPIN, U. Caracterização morfométrica de sete bacias hidrográficas de mesoescala no estado de São Paulo. **Caminhos da Geografia.** Uberlândia:UFU, v. 17, n. 3, p. 20-30, fev. 2006.

- SILVEIRA, N. F. Q. **Análise fractal de bacias hidrográficas de região de encosta e região de planalto com base em cartas topográficas e em fotografias aéreas.** 2006.189p. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.
- STRAHLER, A. N. Dimensional analysis applied to fluvial eroded landforms. **Geological Society of America Bulletin**, v.69, p.279-300, 1958.
- STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography. **Geological Society of America Bulletin**, v.63, n.10, p.1117-1142, 1952.
- STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Geophysical Union Trans.**, v.38, p.912-920, 1957.
- STRAHLER, A. N. **Physical Geography.** Nova Iorque:Wiley & Sons, 534p.,1960.
- SUCUPIRA, P. A. P.; PINHEIRO, L.S.; ROSA, M.F. Caracterização morfométrica do médio e baixo curso do rio Acaraú-Ceará-Brasil. IN: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 6. 2006. Goiânia. **Anais...** Goiânia:UFGO, 10p, 2006.
- SZÉKELY, B.; KARÁTON, D. DEM-based morphometry as a tool for reconstructin primary volcanic landforms: examples from the Börzöny Mountains, Hungary. **Geomorphology.** Elsevier, v. 63, p. 25-37, 2004.
- TARBOTON, D. G.; BRAS R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE; I. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. **Hydrological Processes.** 5: p. 81-100. 1991.
- TONELLO, K. C.; DIAS, H. C. T.; SOUZA, A. L.; RIBEIRO, C. A. A. S.; LEITE, F. P. Morfometria da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães – MG. **Revista Árvore.** Viçosa:UFV, v. 30. n.5. set-out, 13p, 2006.
- TORRES, T. G.; PARANHOS FILHO, A. C.; TERUYA JUNIOR, H.; CORRÊA, L. C.; GARCEZ, A. J. S.; COPATTI, A. Utilização dos dados SRTM na geração dos limites da bacia hidrográfica do rio Formoso (Bonito,MS). IN: Simpósio de Geotecnologias no Pantanal, 1. 2006. Campo Grande. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2006. p.145-154.
- TUCKER, G. E.; BRÁS, R. L. Hillsolpe processes, drainage density and landscape morphology. **Water Resources Research.** Washington:American Geophysical Union. v.34, n.10, p.2751-2764, out. 1998.
- TUCKER, G. E.; Catani, F.; Rinaldo, A. Brás, R. L., Statistical analysis of drainage density from digital terrain data. **Geomorphology.** Elsevier, v.36, p.187-202, 2001.
- VALADÃO R. C. **Evolução de Longo-Termo do Relevo do Brasil Oriental: desnudação, superfície de aplanamento e movimentos crustais.** 1998. 243p. Tese (Doutorado em Geologia) Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 1998.

VALADÃO, R. C.; SILVEIRA, J. S. Estratigrafia Quaternária e Evolução do Relevo no Complexo de Bação - dados preliminares. **Revista da Escola de Minas**, Ouro Preto/MG, v. 45, n. 1/2, p. 85-87, 1992.

VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande:UFCG, v.7, n.3, p.529-546, 2003.

VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos:INPE, 2004, 72p.

VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPDATA. IN: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. 2005. Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p.3595-3602.

VALERIANO, M. M. **Modelos digitais de elevação de microbacias elaborados com krigagem**. São José dos Campos:INPE, 2002, 56p.

VALERIANO, M. M., CARVALHO JUNIOR, O. A., Geoprocessamento de modelos digitais de elevação para mapeamento da curvatura horizontal em microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, ano 4, n.1, 2003. p.17-29.

VALERIANO, M. M.; GARCIA, G. J. The estimate of topographical variables for soil erosion modelling through geoprocessing. International Congress of Photogrammetry and Remote Sensing, 33. Amsterdam, 2000. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**. Amsterdam: ISPRS, v.33, part B, p.678-685, 2000.

VALERIANO, M. M.; MORAES, J. F. L. Extração de rede de drenagem e divisores por processamento digital de dados topográficos. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10, Foz do Iguaçu, 2001. **Anais...** São José dos Campos:INPE, 2001. p.517-524.

VESTENA, L. R.; CHECCHIA, T.; KOBAYAMA, M. Análise morfométrica da bacia hidrográfica do caeté, Alfredo Wagner/SC. IN: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 6. 2006. Goiânia. **Anais...** Goiânia:UFGO, 2006. 8p.

VICENS, R. S.; MARQUES, J. S. Características morfométricas e suas relações com a hidrologia de bacias hidrográficas de tabuleiros costeiros no norte do Espírito Santo, Brasil. IN: Simpósio Nacional de Geomorfologia, 6. 2006. Goiânia. **Anais...** Goiânia:UFGO, 2006. 14p.

VOGT, J.V; COLOMBO, R.; BERTOLO, F. DERIVING networks and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. **Geomorphology**. v. 53, p. 281-298, 2003.

WALCOTT, R. C.; SUMMERFIELD, M. A. Scale dependence of hypsometric integrals: an analysis of southeast African basins. **Geomorphology**. (no prelo), p.174-186, 2007.

WELCOMME, R. L. **River Basin**. Rome: FAO, 1983. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/003/X6841E/X6841E00.HTM>>. Acessado em: 20 de março de 2008.

WELCOMME, R. L. **River fisheries**. Rome: FAO, 1985. Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/003/T0537E/T0537E00.htm>>. Acessado em: 20 de março de 2008.

WOLDENBERG, M. J. **Models in Geomorphology**. Londres: George Allen EUnwin, 1985

YAMAMOTO, K. J. **Geoestatística Online**. Desenvolvido por Alex M. Hubner. São Paulo. 2008. Disponível em: <<http://www.igc.usp.br/subsites/geoestatistica/index.html>> Acessado em: 20 de maio de 2008.