



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15253-TDI/1339

**ANÁLISE ORIENTADA A OBJETO APLICADA AO
MAPEAMENTO DE UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS A
PARTIR DE DADOS ASTER/TERRA**

Flavio Fortes Camargo

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelas Dr^{as}. Teresa Gallotti Florenzano e Cláudia Maria de Almeida, aprovada
em 31 de março de 2008.

O original deste documento está disponível em:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/02.12.12.07>>

INPE
São José dos Campos
2008

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação Observação da Terra (OBT)

Membros:

Dr^a Maria do Carmo de Andrade Nono - Conselho de Pós-Graduação

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr^a Inez Staciarini Batista - Coordenação Ciências Espaciais e Atmosféricas (CEA)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon - Coordenação de Observação da Terra (OBT)

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Marciana Leite Ribeiro - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Yolanda Ribeiro da Silva e Souza - Serviço de Informação e Documentação (SID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant'Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-15253-TDI/1339

**ANÁLISE ORIENTADA A OBJETO APLICADA AO
MAPEAMENTO DE UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS A
PARTIR DE DADOS ASTER/TERRA**

Flavio Fortes Camargo

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelas Dr^{as}. Teresa Gallotti Florenzano e Cláudia Maria de Almeida, aprovada
em 31 de março de 2008.

O original deste documento está disponível em:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/02.12.12.07>>

INPE
São José dos Campos
2008

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C14a Camargo, Flavio Fortes.

Análise Orientada a Objeto aplicada ao mapeamento de unidades morfológicas a partir de dados ASTER/TERRA/ Flavio Fortes Camargo. – São José dos Campos: INPE, 2008.

171p. ; (INPE-15253-TDI/1339)

1. Sensoriamento remoto. 2. Geomorfologia. 3. Mapeamento. 4. Modelos Digitais de Elevação. 5. Segmentação. 6. Análise Orientada a Objeto. 7. Lógica Fuzzy. I. Título.

CDU 528.854

Copyright © 2008 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, microfilmico, reprográfico ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2008 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

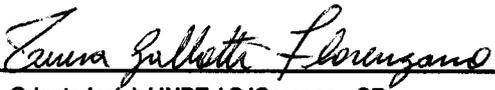
**Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Mestre em
Sensoriamento Remoto**

Dr. Lênio Soares Galvão



Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Teresa Gallotti Florenzano



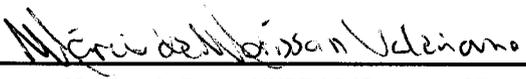
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Cláudia Maria de Almeida



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Márcio de Morisson Valeriano



Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Cristina Maria Bentz



Convidado(a) / PETROBRAS / Rio de Janeiro - RJ

Aluno (a): Flavio Fortes Camargo

São José dos Campos, 31 de Março de 2008

“(...) God has chosen the best of all possible worlds...”

Leibniz (1710)

À minha família, pelo apoio e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Às Doutoradas Teresa Gallotti Florenzano e Cláudia Maria de Almeida, pela atenção e apoio durante todo o processo de orientação.

Aos membros da banca da proposta de dissertação, Doutores Lênio Soares Galvão, Márcio de Morisson Valeriano e Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo, pelas relevantes sugestões e contribuições.

Ao Dr. Carlos Roberto de Souza Filho (IG-UNICAMP), pela cessão das imagens ASTER/Terra utilizadas nesta pesquisa.

Ao Doutorando Cleber Gonzáles de Oliveira, pelo auxílio e discussões sobre modelagem digital do terreno e qualidade geométrica de dados cartográficos.

Ao Mestre em Sensoriamento Remoto Orlando Zaloti, pelas discussões sobre métodos de validação da acurácia posicional de Modelos Digitais de Elevação.

Aos Doutorandos Ramon Freitas e Marcos Adami, pela ajuda prestada no desenvolvimento de rotina em MatLab.

À Doutoranda Carmen Midaglia, pela cessão do manual de foto-interpretação do ITC (*Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*).

Ao Dr. Pedro Walfir (UFPA) pelo envio da publicação ITC n. 10 (*The ITC System of Geomorphologic Survey*).

À Coordenação Acadêmica do curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto e à Divisão de Sensoriamento Remoto (DSR-INPE), pelo apoio material imprescindível ao desenvolvimento desta pesquisa.

Às instituições (INPE, IEAv-CTA e FUNCATE) que cederam as coordenadas GPS, empregadas na validação do MDE ASTER/Terra.

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi desenvolver uma metodologia semi-automatizada de mapeamento geomorfológico, utilizando análise orientada a objeto (AOO). A área de estudo foi o município de São José dos Campos (SP). Com esse intuito, utilizaram-se redes semânticas hierárquicas (formalismo oriundo da AOO) para armazenamento e replicação do conhecimento do especialista/geomorfólogo, além de lógica *fuzzy* e um conjunto de variáveis multiespectrais, texturais e geomorfométricas, principalmente. As variáveis texturais e geomorfométricas foram derivadas de MDE obtido de imagens estereoscópicas do sensor ASTER/Terra. A acurácia plani-altimétrica desse MDE foi avaliada de acordo com as Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Os objetos da análise foram obtidos por meio da segmentação multi-resolução (em quatro níveis) de algumas variáveis selecionadas. Uma rede inicial foi concebida para a classificação das macro-unidades geomorfológicas, a qual foi posteriormente detalhada, de forma a permitir a classificação de 15 unidades geomorfológicas finais. A avaliação da classificação das unidades finais foi realizada de dois modos: (i) com edição das macro-unidades geomorfológicas, e (ii) sem a edição dessas, a fim de eliminar o viés na acurácia do nível fino, introduzido por ajustes manuais feitos no nível grosseiro. Para avaliação da classificação, calcularam-se as estabilidades dos objetos - por meio da diferença entre o maior e o segundo maior valor de pertinência *fuzzy* - e foram realizadas comparações, a partir de matrizes de erros, com um mapa de referência obtido da interpretação visual das imagens estereoscópicas citadas anteriormente. Houve, em todas as classificações, o predomínio de objetos estáveis. Com relação às matrizes de erros, os melhores resultados das estatísticas calculadas (acurácia global, acurácia do produtor, acurácia do usuário e índice Kappa) foram fornecidos pelas classificações das macro-unidades geomorfológicas e das unidades geomorfológicas detalhadas com edição. Diante disso, concluiu-se que o MDE ASTER/Terra é adequado para mapeamentos geomorfológicos na escala de 1:50.000 e, também, que AOO é uma metodologia adequada para a semi-automação de procedimentos relacionados à cartografia geomorfológica.

OBJECT-ORIENTED ANALYSIS APPLIED TO THE MAPPING OF GEOMORPHOLOGICAL UNITS BASED ON ASTER/TERRA DATA

ABSTRACT

The aim of this research was to develop a semi-automatic geomorphological mapping methodology, using object-oriented analysis (OOA). The study area was the municipality of São José dos Campos, located in São Paulo State, Brazil. For this end, hierarchical semantic networks (meant for the storage and reproduction of expert knowledge) together with fuzzy logic and a set of multispectral, textural, and geomorphometric variables were used. The textural and geomorphometric variables were extracted from the DEM, obtained from a pair of stereoscopic ASTER/Terra images. Both the planimetric and altimetric accuracy of the DEM were evaluated in accordance with the National Cartography Technical Legislation. The objects for analysis were generated by a four-level multi-resolution segmentation, taking into account specific variables. The hierarchical semantic net was initially conceived to classify the geomorphological macro-units and was then further detailed to allow a finer classification, which amounted to fifteen classes of geomorphological units. The classification evaluation at the fine level was carried out in two ways: (i) with a manual editing of the macro units level, and (ii) without such editing, so as to avoid the bias in the accuracy of the fine level, introduced by the manual adjustments done at the macro level. In order to accomplish the classification evaluation, the Definiens Stability Index (difference between the first and second highest values of fuzzy membership) was calculated for each object, and an object-based Kappa statistics was also assessed based on a ground truth map, produced from a visual interpretation of the above-mentioned stereoscopic images. In all classification results, stable objects prevailed. Regarding the error matrix, the best statistics indices (global accuracy, producer's accuracy, consumer's accuracy, and Kappa index) were attained by classification results, both at the macro and fine levels, subject to prior editing. In face of what is above exposed, the DEM generated from the ASTER/Terra images has proved to be appropriate for geomorphological mapping at a 1:50,000 scale, and the OOA has shown to be a suitable method for semi-automatic procedures in geomorphological cartography.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE QUADROS	
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	
1 INTRODUÇÃO	27
1.1 Contexto da pesquisa	27
1.2 Objetivo geral	28
1.3 Objetivos específicos	29
1.4 Organização do documento	29
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1 Cartografia geomorfológica	31
2.1.1 Breve histórico	31
2.1.2 Interpretação visual e representação cartográfica	34
2.2 Sistemas Especialistas	36
2.2.1 AOO e redes semânticas hierárquicas	38
2.2.2 Lógica <i>fuzzy</i>	40
2.2.3 SEs e aplicações em cartografia geomorfológica	42
2.3 Segmentação de imagens de Sensoriamento Remoto	43
2.4 Geração de MDEs e ortorretificação de imagens orbitais	46
2.4.1 Geração de MDEs de imagens estereoscópicas orbitais	46
2.4.2 Ortorretificação de imagens orbitais	50
2.5 Avaliação da acurácia posicional de MDEs	50
2.5.1 Análise da exatidão	50
2.5.2 Acurácia vertical relativa	53
2.6 Variáveis geomorfométricas	54
2.7 Variáveis texturais	55
2.8 Avaliação da classificação	57
2.8.1 Matriz de erros	57
2.8.2 Estabilidade da classificação	59

2.9	O sistema sensor ASTER	60
3	ÁREA DE ESTUDO	63
4	MATERIAL E MÉTODOS	67
4.1	Material.....	67
4.2	Métodos	68
4.2.1	Geração do mapa geomorfológico de referência.....	70
4.2.1.1	Preparação de par estereoscópico de imagens ASTER em estação digital 3D.....	70
4.2.1.2	Interpretação visual e restituição de unidades geomorfológicas homogêneas.....	73
4.2.2	Extração de MDE de par estereoscópico de imagens ASTER/Terra	77
4.2.2.1	Validação do MDE	78
4.2.2.1.1	Análise da exatidão.....	78
4.2.2.1.2	Acurácia vertical relativa.....	80
4.2.3	Classificação semi-automatizada de unidades geomorfológicas com base em modelos cognitivos	81
4.2.3.1	Variáveis iniciais	81
4.2.3.2	Classificação das macro-unidades geomorfológicas	82
4.2.3.2.1	Estratégia de segmentação.....	82
4.2.3.2.2	Conversão das chaves de interpretação em atributos	84
4.2.3.2.3	Definição da rede semântica hierárquica e classificação.....	87
4.2.3.2.4	Pós-processamentos.....	89
4.2.3.3	Classificação das unidades geomorfológicas detalhadas.....	90
4.2.3.3.1	Estratégia de segmentação.....	90
4.2.3.3.2	Conversão das chaves de interpretação em atributos	91
4.2.3.3.3	Definição da rede semântica hierárquica e classificação.....	93
4.2.3.3.4	Pós-processamentos.....	96
4.2.3.4	Sinopse das redes semânticas hierárquicas.....	96
4.2.3.5	Análise das incertezas e validação das classificações	100
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	101
5.1	Validação do MDE.....	101

5.2	Mapa geomorfológico de referência.....	105
5.3	Classificação das macro-unidades geomorfológicas.....	107
5.3.1	Segmentação.....	107
5.3.2	Classificação e pós-processamentos.....	109
5.4	Classificação das unidades geomorfológicas detalhadas.....	115
5.4.1	Segmentação.....	115
5.4.2	Classificação e pós-processamentos.....	118
5.5	Análise das incertezas e validação das classificações.....	122
6	CONCLUSÕES.....	129
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133
	APÊNDICE A – Discrepâncias planimétricas.....	142
	APÊNDICE B – Discrepâncias altimétricas.....	143
	APÊNDICE C – Algoritmo para o cálculo da acurácia vertical relativa.....	146
	APÊNDICE D – Funções <i>fuzzy</i> utilizadas na classificação dos corpos d’água.....	147
	APÊNDICE E – Funções <i>fuzzy</i> utilizadas na classificação da densidade de drenagem.....	148
	APÊNDICE F – Funções <i>fuzzy</i> utilizadas na classificação das macro-unidades geomorfológicas.....	151
	APÊNDICE G – Funções <i>fuzzy</i> utilizadas na classificação das unidades geomorfológicas detalhadas.....	157

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Modelos de representação gráfica: padrões de relevo (a) e elementos de relevo (b).	36
2.2 – Exemplos de funções <i>fuzzy</i> : a) triangular, b) trapezoidal e c) gaussiana.....	40
2.3 – Imagens brutas e imagens epipolares.	49
2.4 – Exemplo hipotético dos componentes utilizados no cálculo da acurácia vertical relativa	53
3.1 – Localização da área de estudo (MDE ASTER com aplicação da técnica de relevo sombreado).....	63
4.1 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos.....	69
4.2 – Cobertura das imagens do par estéreo e distribuição dos GCPs e TPs.	71
4.3 – Imagem epipolar esquerda gerada da banda 3N do sistema sensor ASTER.	72
4.4 – Imagem epipolar direita gerada da banda 3B do sistema sensor ASTER.	73
4.5 – Distribuição dos pontos de validação da altimetria (a) e da planimetria (b).	79
4.6 – Exemplo de coleta de pontos para a validação planimétrica:	80
4.7 – Exemplo de procedimento para análise exploratória de atributos:.....	85
4.8 – Rede semântica hierárquica utilizada na classificação das macro-unidades geomorfológicas	88
4.9 – Rede semântica hierárquica utilizada na classificação das unidades geomorfológicas detalhadas.	95
4.10 – Ilustração da rede semântica hierárquica e dos níveis de segmentação (macro-unidades geomorfológicas).	96
4.11 – Ilustração da rede semântica hierárquica e dos níveis de segmentação (unidades geomorfológicas detalhadas).	98
5.1 – MDE, ausência de dados (círculos) e limite de cobertura da cena ASTER.....	101
5.2 – MDE sombreado (azimute = 315°; elevação = 45°) e feições espúrias.	102
5.3 – Distribuição das diferenças (em metros, na ordenada) obtidos da análise da da acurácia vertical relativa, para cada par de pontos (na abscissa).....	104
5.4 – Mapa geomorfológico obtido da interpretação visual.	106
5.5 – Exemplo dos resultados da segmentação dos corpos d'água.	107
5.6 – Exemplo de resultado da segmentação da imagem temática da rede de drenagem.	107
5.7 – Células, obtidas da segmentação do relevo sombreado, empregadas no cálculo da densidade de drenagem	108
5.8 – Exemplo de resultados obtidos da segmentação do MDE ASTER.	109
5.9 – Edição realizada na segmentação obtida do MDE ASTER.....	109
5.10 – Classificação dos corpos d'água.....	110
5.11 – Exemplos dos resultados obtidos da classificação dos corpos d'água.	111
5.12 – Segmentos obtidos da imagem temática da rede de drenagem (a) e classificação dos canais de drenagem (b) empregada no cálculo da densidade de drenagem.....	111

5.13 – Classificação da densidade de drenagem a partir da área relativa dos canais (a) e refinamento da classificação (b) a partir de subclasses representando os erros de comissão.....	112
5.14 – Resultados iniciais da classificação das macro-unidades geomorfológicas. ...	113
5.15 – Resultados obtidos a partir da criação das subclasses de erros de comissão...	114
5.16 – Resultado final da classificação semi-automatizada das macro-unidades geomorfológicas	115
5.17 – Resultados da segmentação baseada em classificação: em (a) um exemplo dos objetos da segmentação das macro-unidades geomorfológicas e, em (b), esses objetos agrupados por classes.....	116
5.18 – Exemplos das delimitações obtidas da segmentação do relevo sombreado. ...	117
5.19 – Edições (tracejados em verde) realizadas na segmentação obtida do relevo sombreado.....	118
5.20 – Resultados iniciais da classificação das unidades geomorfológicas detalhadas.	119
5.21 – Decréscimo da confusão a partir do aumento gradativo (entre a e c) de subclasses referentes aos erros de comissão.....	120
5.22 – Classificação das unidades geomorfológicas detalhadas sem procedimento intermediário de edição	121
5.23 – Classificações das unidades geomorfológicas detalhadas: (a) com procedimento intermediário de edição e (b) sem procedimento intermediário de edição.....	121
5.24 – Estabilidade da classificação das macro-unidades geomorfológicas.	122
5.25 – Estabilidade da classificação das unidades geomorfológicas detalhadas: a) com edição temática das macro-unidades geomorfológicas e b) sem edição temática das macro-unidades geomorfológicas.....	124

LISTA DE TABELAS

2.1 – Variáveis geomorfométricas utilizadas.	55
2.2 – Variáveis texturais obtidas do método GLCM.	56
2.3 – Exemplo de matriz de erros.	59
2.4 – Medidas de acurácia extraídas da Tabela 2.4.	59
2.5 – Subsistemas do sensor ASTER e suas principais características.	61
4.1 – Resumo das características do modelo ajustado.	71
4.2 – Padrão de exatidão planimétrico e erro padrão para as classes A, B e C.	78
4.3 – Padrão de exatidão altimétrico e erro padrão para as classes A, B e C.	78
4.4 – Variáveis e parâmetros utilizados na segmentação das macro-unidades geomorfológicas.	83
4.5 – Atributos das macro-unidades geomorfológicas e reservatórios.	85
4.6 – Atributos da classe corpos d’água.	86
4.7 – Atributos empregados na classificação da densidade de drenagem.	86
4.8 – Atributos empregados no refinamento da densidade de drenagem, a partir de subclasses de erros de comissão.	87
4.9 – Atributos empregados no refinamento das macro-unidades geomorfológicas, a partir de subclasses de erros de comissão.	89
4.10 – Variáveis e parâmetros utilizados na segmentação das unidades geomorfológicas detalhadas.	91
4.11 – Atributos das formas de agradação (unidades geomorfológicas detalhadas). ..	92
4.12 – Atributos das formas de denudação (unidades geomorfológicas detalhadas). ..	92
4.13 – Atributos das formas estruturais-denudacionais (unidades geomorfológicas detalhadas).	92
4.14 – Atributos empregados no refinamento das unidades geomorfológicas detalhadas, a partir de subclasses de erros de comissão.	94
4.15 – Resumo das principais variáveis e atributos empregados na classificação das macro-unidades geomorfológicas.	97
4.16 – Resumo das principais variáveis e atributos empregados na classificação das unidades geomorfológicas detalhadas.	98
5.1 – Resumo das estatísticas de validação do MDE ASTER.	103
5.2 – Estatísticas (em metros) obtidas da análise da acurácia vertical relativa.	104
5.3 – Matriz de erros da classificação das macro-unidades geomorfológicas.	123
5.4 – Acurácias do produtor e do usuário para cada macro-unidade geomorfológica.	123
5.5 – Matriz de erros da classificação das unidades geomorfológicas detalhadas, com edição temática das macro-unidades geomorfológicas.	125
5.6 – Matriz de erros da classificação das unidades geomorfológicas detalhadas, sem edição temática das macro-unidades geomorfológicas.	125
5.7 – Acurácias do produtor e do usuário para cada unidade geomorfológica detalhada.	125
5.8 – Acurácias do produtor e do usuário para cada unidade geomorfológica detalhada (obtidas sem procedimentos de edição).	126

LISTA DE QUADROS

4.1 – Classes de variáveis geomorfométricas.....	54
4.2 – Relação do material utilizado.	68
4.3 – Relação de aplicativos utilizados.....	68
4.4 – Chaves de interpretação das formas de agradação.	75
4.5 – Chaves de interpretação das formas de denudação.	75
4.6 – Chaves de interpretação das formas estruturais-denudacionais.	77
4.7 – Resumo das variáveis iniciais dos modelos cognitivos.....	82
5.1 – Legenda do mapa geomorfológico obtido da interpretação visual.....	105

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AOO: Análise Orientada a Objeto

ASTER: *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

CCRS: *Canada Centre for Remote Sensing*

COAMES: *COAstal Management Expert System*

EOS: *Earth Observation System*

EP: Erro Padrão

FUNCATE: Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais

GCP: *Ground Control Points*

GLCM: *Grey Level Co-occurrence Matrix*

GLDV: Grey Level Difference Vector

GUI: *Graphic User Interface*

IA: Inteligência Artificial

IEAv: Instituto de Estudos Avançados da Aeronáutica

IGU: *International Geographical Union*

INPE: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

ITC: *International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences*

MAUP: *Modifiable Areal Unit Problem*

MDE: Modelo Digital de Elevação

NASA: *National Aeronautics and Space Administration*

PC: *Personal Computers*

PEC: Padrão de Exatidão Cartográfica

PMSJC: Prefeitura Municipal de São José dos Campos (SP)

SC: Sistema Convencional

SE: Sistema Especialista

SIG: Sistemas de Informações Geográficas

SWIR: *Short Wave InfraRed*

TIR: *Thermal Infrared*

TP: *Tie Points*

VNIR: *Visible and Near-InfraRed*

VG: Variável Geomorfométrica

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto da pesquisa

Mapas geomorfológicos representam uma fonte de dados imprescindível em estudos e atividades de intervenção no meio físico. Esses mapas fornecem informações relevantes às pesquisas geomorfológicas e, também, são úteis em atividades aplicadas, tais como, inventários de recursos naturais, prevenção de desastres e planejamento urbano e rural (EMBLETON; VERSTAPPEN, 1988).

As pesquisas geomorfológicas são beneficiadas pelas análises detalhadas das formas de relevo, que propiciam o entendimento da dinâmica evolutiva da paisagem estudada. Em inventários de recursos naturais, por exemplo, a cartografia geomorfológica auxilia na seleção de lugares potencialmente propícios à prospecção mineral e, por conseguinte, direciona e complementa o emprego de métodos geofísicos e geológicos mais avançados. Nas atividades de planejamento territorial, o conhecimento detalhado do relevo propicia o zoneamento adequado de áreas de risco, como forma de prevenção de desastres naturais, e, também, critérios para atividades de regionalização que visam ao ordenamento urbano e rural (EMBLETON; VERSTAPPEN, 1988).

O Sensoriamento Remoto é uma das principais fontes de dados para as atividades de mapeamento geomorfológico. Desde o início, as fotografias aéreas têm sido amplamente utilizadas em procedimentos monoscópicos e estereoscópicos de interpretação visual (ZUIDAM, 1986). Atualmente, uma ampla gama de novos sensores, aerotransportados e orbitais, adquire dados (monoscópicos e estereoscópicos) nas faixas espectrais do visível e de microondas. Aliado a isso, o emprego de métodos fotogramétricos (TOUTIN, 2001), por exemplo, possibilitam a extração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs), úteis às atividades de mapeamento geomorfológico.

Paralelamente ao avanço tecnológico dos sensores, os avanços das ciências da computação têm propiciado o desenvolvimento de sistemas para análise de dados geográficos e automação de tarefas de mapeamento geomorfológico. A automação é realizada por meio de sistemas computacionais convencionais ou sistemas

computacionais especialistas. Os sistemas convencionais realizam processamento algorítmico e são guiados pelas variáveis estatísticas dos dados. Enquanto os sistemas especialistas empregam estratégias de armazenamento e replicação do conhecimento humano (MOORE, 2000).

Nesse contexto, a cartografia geomorfológica dispõe atualmente de um conjunto de tecnologias (de aquisição e tratamento de dados) que possibilitam o avanço das pesquisas puras e aplicadas sobre o meio físico. Isso incrementa a capacidade de análise e entendimento das formas de relevo, bem como, a qualidade de processos decisórios relacionados às atividades aplicadas de inventários de recursos naturais, prevenção de desastres e planejamento urbano e rural.

No âmbito desta pesquisa, os recursos estereoscópicos do sensor ASTER/Terra e a flexibilidade de sistemas especialistas de interpretação de imagens de sensoriamento remoto, que se baseiam em análise orientada a objeto, foram empregados na semi-automatização de procedimentos relacionados à cartografia geomorfológica. O par estereoscópico ASTER/Terra, de imagens do infravermelho próximo, possibilita ao especialista a interpretação visual em ambiente 3D digital e, também, condições geométricas adequadas à extração de MDEs. No tocante aos sistemas especialistas, empregaram-se redes semânticas hierárquicas (formalismo oriundo da análise orientada a objeto) e lógica *fuzzy*. As redes semânticas hierárquicas foram utilizadas na representação, armazenamento e replicação do conhecimento, enquanto, a lógica *fuzzy* foi utilizada na estimativa das incertezas da classificação.

1.2 Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia semi-automatizada de mapeamento geomorfológico a partir de uma abordagem que se baseia em conhecimento especialista e variáveis derivadas de MDE ASTER/Terra, para o município de São José dos Campos (SP).

1.3 Objetivos específicos

- a) Gerar um MDE por meio de imagens estereoscópicas orbitais, obtidas pelo sensor óptico ASTER/Terra.
- b) Avaliar a acurácia posicional do MDE obtido.
- c) Investigar e estabelecer estratégias de segmentação aplicadas a dados derivados de MDE.
- d) Estabelecer uma metodologia de armazenamento e replicação do conhecimento, por meio de redes semânticas hierárquicas, para a classificação de unidades geomorfológicas.
- e) Avaliar as incertezas da classificação semi-automatizada e a comparar ao mapa obtido da interpretação visual.

1.4 Organização do documento

O documento está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: introdução (contexto da pesquisa e objetivos).
- Capítulo 2: contém uma revisão bibliográfica sobre os principais aspectos teóricos necessários ao desenvolvimento desta pesquisa.
- Capítulo 3: são descritas as principais características fisiográficas da área de estudo.
- Capítulo 4: apresenta a relação de materiais utilizados e os procedimentos metodológicos adotados.
- Capítulo 5: são apresentados e discutidos os resultados obtidos.
- Capítulo 6: conclusões.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Cartografia geomorfológica

2.1.1 Breve histórico

Cartografia geomorfológica é uma técnica central em Geomorfologia. Foi desenvolvida para apoiar a pesquisa geomorfológica pura por meio de inventários detalhados das formas de relevo (EMBLETON; VERSTAPPEN, 1988). Sua origem data do início do século XX com os trabalhos pioneiros de Gehne (1912) e Passarge (1920). Porém, seu desenvolvimento e difusão se incrementaram somente após a Segunda Guerra Mundial a partir de inventários realizados em países europeus, com destaque para os mapeamentos sistemáticos da Polônia (BURACZYNSKI, 1990).

Segundo Klimaszewski (1988), o objetivo da cartografia geomorfológica é a geração de mapas geomorfológicos detalhados, que apresentem um quadro sinóptico da área examinada, provendo interpretação genética e cronológica e que auxiliem no desenvolvimento econômico e na utilização racional da superfície terrestre.

Na Europa da segunda metade do século XX, a diversidade de métodos para elaboração e representação de mapas geomorfológicos impossibilitava a análise e a integração dos diferentes levantamentos existentes. Diante disso, a padronização dos métodos foi o tema principal do 18º Congresso da *International Geographical Union* (IGU), no Rio de Janeiro, em 1956. As discussões sobre esse tema culminaram na criação da Subcomissão de Mapeamento Geomorfológico no congresso seguinte (1960), em Estocolmo. Essa subcomissão foi incumbida das seguintes tarefas (KLIMASZEWSKI, 1982):

1. Introduzir e desenvolver a metodologia do mapeamento geomorfológico.
2. Adotar um sistema uniforme para mapeamento geomorfológico que garanta compatibilidade.

3. Demonstrar as aplicações do mapeamento geomorfológico no planejamento econômico local e regional e auxiliar na utilização racional da superfície terrestre.

Os trabalhos prosseguiram e, em 1962, membros de 15 países se reuniram na Polônia e estabeleceram oito diretrizes para a elaboração de mapas geomorfológicos detalhados, a saber (KLIMASZEWSKI, 1982):

1. Utilização de fotografias aéreas e controle de campo.
2. Mapeamento nas escalas de 1:10.000 a 1:100.000, nas quais o relevo e suas peculiaridades podem ser representados.
3. Mapeamento de todos os aspectos do relevo, incluindo morfografia, morfometria, morfogênese e morfocronologia, de forma a possibilitar a compreensão das dinâmicas passada e presente e a construção de cenários futuros.
4. Utilização de cores e símbolos na representação.
5. O estabelecimento de ordem cronológica no desenvolvimento das formas de relevo.
6. A inclusão de dados litológicos.
7. Legenda em ordem genético-cronológica.
8. O reconhecimento de que mapas geomorfológicos detalhados são essenciais para o desenvolvimento da Geomorfologia.

A morfografia (item 3) consiste na aparência ou forma da paisagem (HAYDEN, 1986). Assim, são atribuídos às unidades nomes, tais como terraços fluviais, superfícies erosivas etc. (VERSTAPPEN, 1983). Morfometria é o conjunto de dados quantitativos (declividade, amplitude altimétrica etc.) que descreve as formas de relevo (HAYDEN, 1986). A morfogênese se refere ao processo que originou as formas de relevo. Essas

podem ter sido formadas por processos erosivos, agradacionais, tectônicos, entre outros. O último aspecto, morfocronologia, representa a determinação da idade (relativa ou absoluta) das formas e possibilita a identificação de formas recentes e/ou herdadas de eras ou períodos anteriores (VERSTAPPEN, 1983).

No Congresso da IGU em Nova Déli (1968), a subcomissão foi responsabilizada pela elaboração da legenda do mapa geomorfológico da Europa e também pela publicação de um manual de mapeamento geomorfológico detalhado (DEMEK, 1972).

Apesar dos esforços de padronização, a heterogeneidade da superfície terrestre implica particularidades locais e regionais que impedem o emprego universal de uma legenda unificada. Além disso, padronização total é uma necessidade absoluta somente em inventários sistemáticos (VERSTAPPEN, 1983).

Desse modo, a diversidade de sistemas permanece. Os principais sistemas utilizados são: o Francês (Centro de Geografia Aplicada, Estrasburgo), o IGU e o proposto pelo *International Institute for Aerial Survey and Earth Sciences* (ITC) (FLORENZANO, 1993). Recentemente, Gustavsson et al. (2006) apresentam uma revisão dos sistemas anteriores e propõem um novo sistema (com nova simbologia) que se baseia em recursos gráficos disponíveis em Sistemas de Informações Geográficas (SIGs). Nesta dissertação, adotou-se o sistema ITC devido à sua legenda flexível que dispõe de recursos gráficos variados.

Com respeito ao Brasil, deve-se destacar a contribuição metodológica e o mapeamento sistemático realizados pelo Projeto RADAMBRASIL (DNPM, 1983). Sua legenda enfatiza os aspectos morfológicos e morfogenéticos, além de apresentar informações morfométricas importantes, sintetizadas em uma matriz de dissecação das formas de relevo (FLORENZANO, 2008). Outro trabalho importante foi o mapa geomorfológico do Estado de São Paulo, realizado pelo IPT (1981b), o qual se baseou na proposta teórica australiana. Destaque também deve ser dado às contribuições de Ross (1992) e de Ross e Moroz (1997), os quais aperfeiçoaram a metodologia empregada pelo projeto RADAMBRASIL. Em seguida, na Seção 2.1.2, são detalhados os principais aspectos

teóricos relacionados aos procedimentos de interpretação visual e representação cartográfica de fatos geomorfológicos.

2.1.2 Interpretação visual e representação cartográfica

A interpretação visual de imagens de Sensoriamento Remoto (monoscópicas ou estereoscópicas) é uma etapa fundamental de qualquer atividade de mapeamento geomorfológico. Zuidam (1986) destaca quatro fases principais no processo de interpretação visual, a saber:

1. Foto-leitura: essa é subdividida em três passos: (i) detecção, (ii) reconhecimento e (iii) identificação. A detecção (i), instante inicial da interpretação, consiste no conhecimento geral da existência de objetos distintos. No segundo passo, reconhecimento (ii), o intérprete analisa as propriedades (forma, tamanho etc.) dos objetos. No passo final, identificação (iii), as evidências convergem e os objetos são identificados e recebem nomes conhecidos. Os passos de reconhecimento e identificação, geralmente, são executados por meio de chaves de interpretação compostas de elementos como tonalidade, padrão, textura, forma, tamanho, sombra, contexto etc.
2. Análise: consiste no emprego de uma legenda e procedimentos sistematizados para delimitação/restituição de padrões ou agrupamentos das unidades de interesse.
3. Classificação: nessa fase o intérprete acrescenta à análise dados laboratoriais, de campo e de outras fontes para, enfim, rotular as unidades delimitadas.
4. Dedução: consiste na tomada de decisão a partir da convergência de evidências. Essa também é considerada como um processo inerente às demais fases.

A visão estereoscópica é fundamental na interpretação visual de fatos geomorfológicos. Atualmente, nas estações 3D digitais, essa é obtida por meio de três métodos: (i) apresentação das imagens em duas janelas separadas (estereograma); (ii) anaglifos e (iii)

a apresentação alternada das duas imagens em cada olho a partir de equipamentos especiais (óculos e monitor) (LINDER, 2006).

Os anaglifos (ii), que representam a alternativa de custo mais acessível, consistem na apresentação de imagens sobrepostas e com cores primárias distintas. A imagem da direita emprega a cor vermelha e a da esquerda emprega a cor azul. Desse modo, as cores funcionam como filtros, permitindo que cada olho (por meio de óculos com uma lente vermelha e outra azul) observe uma única imagem. No caso do terceiro método, o monitor e os óculos podem ligar e desligar, rapidamente e de forma sincronizada, as imagens de cada olho ou separar a radiação em polarizações horizontal e vertical. Em equipamentos que empregam polarização, cada olho recebe uma polarização distinta, o que permite a visão estereoscópica (LINDER, 2006).

Com relação à representação cartográfica das unidades geomorfológicas, essa é feita por meio de duas abordagens: (i) modelo de padrões de relevo (*landform patterns model*) e (ii) modelo de elementos de relevo (*landform elements model*) (HAYDEN, 1986). No primeiro modelo, a superfície terrestre é vista como um fenômeno tridimensional repetitivo, no qual as unidades elementares ocorrem em intervalos quase regulares e em padrões definidos (representações em áreas). No segundo, mais descritivo, a paisagem é separada em elementos geométricos de acordo com a escala (representações lineares). A Figura 2.1 ilustra as diferenças entre os modelos de representação gráfica: no modelo de padrões de relevo (a), a paisagem hipotética é descrita por meio de três objetos (colina, ravina e planície); no modelo de elementos de relevo (b), uma colina é descrita por uma crista acompanhada de escarpas, a ravina por um curso d'água envolto de escarpas, e a planície é representada da mesma forma como no modelo de padrões de relevo.

Pela influência das escolas polonesa e russa, o sistema IGU adota o modelo de padrões de relevo (HAYDEN, 1986), enquanto o sistema francês utiliza o modelo de elementos de relevo (TROPPEMAIR, 1970). Por outro lado, os sistemas ITC (VERSTAPPEN; ZUIDAM, 1991) e o proposto por Gustavsson et al. (2006) conciliam ambos os modelos de representação gráfica.

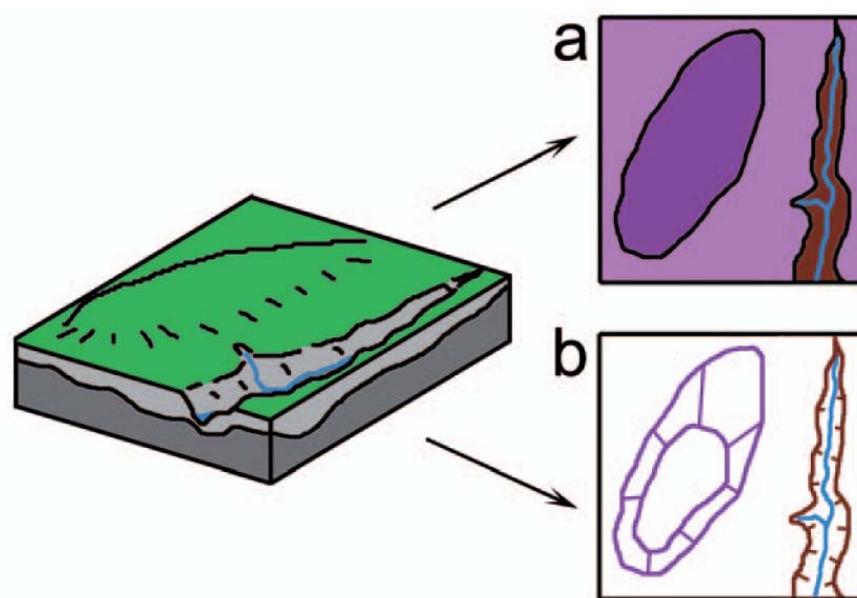


Figura 2.1 - Modelos de representação gráfica: padrões de relevo (a) e elementos de relevo (b).
 Fonte: Adaptada de Gustavsson (2006, p. 15).

Devido à complexidade da representação cartográfica, mapas geomorfológicos detalhados são de difícil leitura. Em determinadas situações ou objetivos, Embleton e Verstappen (1988) propõem a elaboração direta de mapas sintéticos (com legendas simples direcionadas a aplicações específicas) ou a simplificação de mapas detalhados em mapas pragmáticos (seleção das informações mais relevantes a uma dada aplicação). Zuidam (1986) denomina os mapas geomorfológicos detalhados de mapas de propósito geral ou “padrão” (*standard or general purpose maps*), e os mapas com legendas específicas (hidro-geomorfológicos, por exemplo), de mapas aplicados ou de propósito especial (*applied or special purpose maps*).

2.2 Sistemas Especialistas

As pesquisas em Inteligência Artificial (IA) se iniciaram no final da década de 1950 e se concentravam na resolução de jogos, principalmente. Posteriormente, o foco dessas se voltou para o armazenamento e replicação do conhecimento, o que ocasionou o surgimento dos Sistemas Especialistas (SE) (MOORE, 2000). Nesse contexto, SEs representam uma ramificação aplicada de IA e consistem em sistemas computacionais

que se baseiam em conhecimento e têm a capacidade de emular ou replicar o raciocínio humano em problemas estruturados ou bem conhecidos (WITLOX, 2005).

O primeiro SE data de meados da década de 1960, desenvolvido na universidade de Stanford. O sistema se chamava DENDRAL, e o conhecimento armazenado foi obtido a partir da codificação do raciocínio de um químico especialista. DENDRAL era capaz de deduzir a estrutura de moléculas complexas a partir de espectrogramas de massa, e o seu nível de desempenho competia com o de um especialista humano (DURKIN, 1996).

Durante os anos de 1970, SEs permaneceram, ainda, como um tema de pesquisa, e os trabalhos seguiram na tentativa de melhorar a representação do conhecimento. Na década seguinte, o desenvolvimento foi direcionado para SEs voltados à resolução de problemas simples e bem estruturados. Essa atitude, aliada à criação dos computadores pessoais (PC - *personal computers*), incrementou a utilização dos SEs. Entre 1980 e 1992, as aplicações comerciais de SEs superaram as acadêmicas, e as áreas comerciais nas quais essas mais cresceram foram, em ordem crescente: (i) medicina; (ii) atividades manufatureiras e (iii) negócios/atividades financeiras (DURKIN, 1996). Segundo Moore (2000), a pouca utilização de SEs em Geografia se deve à complexidade e má-estruturação dos problemas espaciais.

Há quatro aspectos críticos que diferem os SEs dos sistemas convencionais (SCs), a saber: (i) objetivo, (ii) foco, (iii) abordagem e (iv) saídas. O objetivo dos SEs é capturar e distribuir habilidades, enquanto o dos SCs é a implementação de algoritmos. O foco dos SEs é o conhecimento, enquanto o dos SCs, é um conjunto de dados. A abordagem dos SEs é a do raciocínio heurístico, enquanto a dos SCs é a do processamento algorítmico. Finalmente, as saídas geradas pelos SEs são decisões/análises, enquanto a dos SCs, resultados calculados (MOORE, 2000).

O cerne de um SE é o modo como este representa o conhecimento. Existem três modelos conceituais para a realização dessa tarefa: (i) modelo com base em regras, (ii) modelo com base em malhas (*frames*) e (iii) modelo de arquitetura de quadro-negro (*blackboard architecture*). A implementação do primeiro pode ser por meio de regras lógicas em linguagens de programação tradicionais. O segundo emprega,

principalmente, redes semânticas, as quais têm origem na metodologia de análise orientada a objeto (AOO) (MOORE, 2000). O último utiliza estratégias de particionamento do problema em subproblemas e, posteriormente, combina as soluções parciais em uma solução unificada (HALL; LLINAS, 1997). Como o aplicativo utilizado nesta pesquisa emprega AOO e redes semânticas hierárquicas no processo de interpretação de imagens (BENZ et al., 2004), aspectos teóricos importantes sobre esses temas são apresentados na seção seguinte (2.2.1).

2.2.1 AOO e redes semânticas hierárquicas

AOO tem sua origem no desenvolvimento da linguagem *SmallTalk*, no centro de pesquisa da Xerox (Palo Alto, Estados Unidos da América), nos anos de 1970. Essa linguagem propõe uma abordagem intuitiva e, freqüentemente, as soluções de programação se assemelham a métodos que os humanos utilizam para resolver problemas cotidianos (DURKIN, 1996).

Conforme indica a literatura científica, AOO não propõe ser somente uma técnica ou linguagem de programação. Mais do que isso, é uma representação, uma modelagem e um formalismo de abstração (BIAN, 2007; RUMBAUGH et al., 1994). O objetivo principal deste paradigma é representar a percepção humana do mundo. Neste sentido, AOO consiste em uma mudança na filosofia da computação que vai além de uma visão orientada ao computador e atinge uma visão orientada ao conhecimento (como representar o mundo percebido) (BIAN, 2007).

Desse modo, pela sua abrangência, AOO apresenta três níveis de abstração: (i) modelo de objeto (modelo conceitual do mundo definido pelo observador); (ii) modelo dinâmico (modelo formal de acordo com o modelo conceitual) e (iii) modelo funcional (implementação de acordo com os objetos e relações definidos no modelo formal) (RUMBAUGH et al., 1994).

O objeto, unidade básica dessa metodologia, combina estrutura (atributos) e comportamento (operações) dos dados em uma única entidade. As principais

características dos objetos são: (i) identidade, (ii) classificação, (iii) polimorfismo e (iv) herança (RUMBAUGH et al., 1994).

Identidade representa a subdivisão dos dados em entidades discretas e distintas, denominadas de objetos. Classificação é o ato de agrupar objetos com a mesma estrutura de dados e com o mesmo comportamento. Cada objeto é uma instância de uma classe. Polimorfismo consiste na capacidade de operações atuarem de modos diversos em classes diferentes. Finalmente, herança é o compartilhamento de atributos e operações entre classes com base em um relacionamento hierárquico. Uma classe pode ser definida de forma abrangente e depois refinada em sucessivas subclasses mais detalhadas. Cada subclasse incorpora, ou herda, todas as propriedades de sua superclasse e acrescenta suas próprias e exclusivas características. As propriedades da superclasse não precisam ser repetidas em cada subclasse (RUMBAUGH et al., 1994).

De acordo com Moore (2000), AOO é adequada para SEs, pois sua representação se assemelha ao modo como a realidade é percebida. Neste sentido, em SEs com esse tipo de modelo, há estreita proximidade entre a base do conhecimento e o mecanismo de inferência.

Rede semântica, oriunda da metodologia de AOO (MOORE, 2000), é um formalismo de representação do conhecimento que reúne um conjunto de nodos conectados por meio de um conjunto de arcos (BITTENCOURT, 2006). De modo geral, os nodos representam objetos, e os arcos, as relações entre esses. Há diversos tipos de arcos, os mais comuns são: (i) *é-um* e (ii) *é-parte*. Esses arcos são empregados para representar a herança de propriedades (BITTENCOURT, 2006). Assim, *é-um* destaca o relacionamento semântico entre classes genéricas e detalhamentos ou classes particulares, enquanto *é-parte* enfatiza a transferência de atributos.

Um aspecto importante do raciocínio humano é a capacidade de lidar com incertezas ou verdades parciais. Com o objetivo de emular essas habilidades, SEs empregam lógica *fuzzy* e análise bayesiana (MOORE, 2000; MOORE et al., 2003). Na Seção 2.2.2, será dada ênfase à lógica *fuzzy*, pois esta é utilizada pelo sistema de classificação empregado nesta pesquisa (BENZ et al., 2004).

2.2.2 Lógica *fuzzy*

Lógica *fuzzy* foi definida por Zadeh (1996a, 1996b) como um formalismo lógico alternativo, com a capacidade de tratar conceitos inexatos. Conjuntos *fuzzy* são obtidos através de funções que definem para cada objeto de um conjunto X seus respectivos graus de pertinência. Isso é formalizado através de pares ordenados com o valor do objeto x e seu grau de pertinência, $\mu_A(x)$, conforme aponta a Equação 2.1:

$$X = \{x, \mu_A(x)\} \quad (2.1)$$

Desse modo, a função de pertinência é responsável pelo mapeamento dos valores de um conjunto Y para o conjunto X em um intervalo de 0 a 1 (ZADEH, 1996a, 1996b). Essas funções podem ser piramidais, trapezoidais, gaussianas, etc. (MCBRATNEY; ODEH, 1997), conforme ilustração da Figura 2.2.

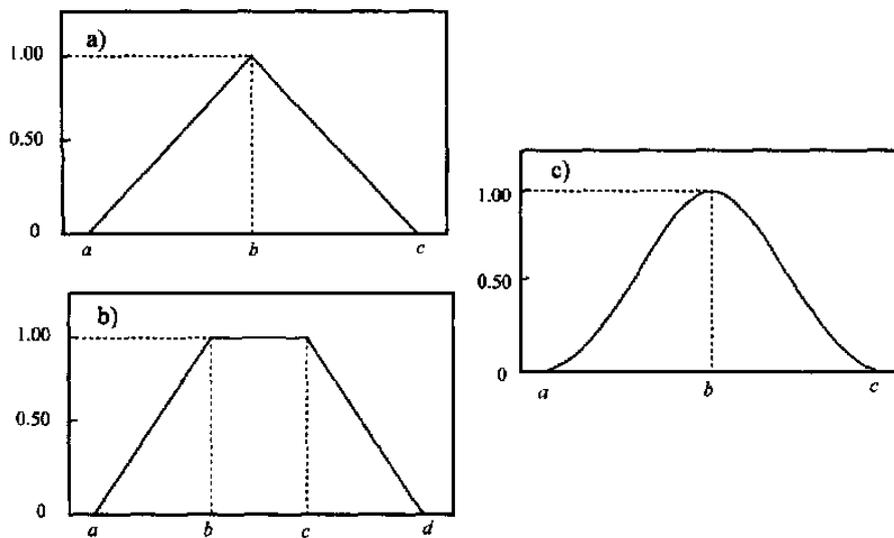


Figura 2.2 – Exemplos de funções *fuzzy*: a) triangular, b) trapezoidal e c) gaussiana.
Fonte: Adaptada de McBratney e Odeh (1997).

As operações aplicadas sobre os conjuntos *fuzzy* são, basicamente, as mesmas aplicadas em conjuntos booleanos. Os principais operadores utilizados são: (i) *fuzzy AND*, (ii) *fuzzy OR*, (iii) *fuzzy Algebraic Product*, (iv) *fuzzy Algebraic Sum* e v) *Gamma Operation* (BOHAM-CARTER, 1994).

O item (i) é equivalente ao operador booleano AND e tende a fornecer valores de pertinência pequenos ou conservadores. Esse é definido como:

$$\mu_{\text{combinação}} = \text{MIN}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad (2.2)$$

Por outro lado, no operador *fuzzy* OR, item (ii), equivalente ao booleano OR, os valores de pertinência resultantes são controlados pelos valores máximos dos conjuntos de entrada, conforme é definido por:

$$\mu_{\text{combinação}} = \text{MAX}(\mu_A, \mu_B, \mu_C, \dots) \quad (2.3)$$

No operador *fuzzy Algebraic Product*, item (iii), todos os valores de pertinência dos conjuntos de entrada contribuem para o valor final. Devido à multiplicação de valores menores do que 1, o resultado final é sempre menor ou igual ao menor valor de pertinência de entrada. O seu cálculo é realizado por:

$$\mu_{\text{combinação}} = \prod_{i=1}^n \mu_i \quad (2.4)$$

No item (iv), *fuzzy Algebraic Sum*, o resultado final é sempre maior do que o maior valor de pertinência de entrada. Desse modo, este operador tem a característica de incrementar as saídas geradas. Sua definição é dada por:

$$\mu_{\text{combinação}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i) \quad (2.5)$$

O item (v), *Gamma operation*, é definido em termos do produto algébrico (*fuzzy Algebraic Product*) e da soma algébrica (*fuzzy Algebraic Sum*), em que γ é um parâmetro definido entre 0 e 1:

$$\mu_{\text{combination}} = (\text{fuzzy algebraic sum})^{\gamma} * (\text{fuzzy algebraic product})^{1-\gamma} \quad (2.6)$$

Quando γ é 1, o resultado é equivalente à soma algébrica e, quando γ é 0, o resultado equivale ao produto algébrico. Desse modo, a seleção criteriosa de valores γ entre 0 e 1 propicia a geração de resultados ou cenários intermediários à soma e ao produto algébricos.

De forma a tornar clara a aplicabilidade de SEs em estudos de mapeamento geomorfológico, na seção seguinte (2.2.3) são apresentados e discutidos alguns trabalhos nessa linha de pesquisa.

2.2.3 SEs e aplicações em cartografia geomorfológica

COAstal Management Expert System (COAMES) é um exemplo de SE aplicado ao mapeamento geomorfológico. Ele foi desenvolvido para identificar e caracterizar feições geomorfológicas litorâneas submetidas a processos erosivos acelerados, em Holderness, na costa noroeste da Inglaterra. O sistema, implementado nas linguagens C++ e Java, tem uma base de conhecimento apoiada na metodologia de AOO, um mecanismo de inferência que emprega dedução lógica (*forward chain*), além de algoritmos para definição de regiões e extração de variáveis geomorfométricas de MDEs (MOORE et al., 2003). Por meio de MDEs extraídos de pares de fotografias aéreas de datas diferentes, Moore et al. (2003) identificaram as principais feições geomorfológicas da área estudada e realizaram uma análise temporal dos processos erosivos.

A partir de uma plataforma comercial de interpretação de imagens baseada em conhecimento (BENZ et al., 2004), alguns autores têm proposto estratégias semi-automatizadas para mapeamento geomorfológico (ASSELEN; SEIJMONSBERGEN, 2006) e identificação de elementos de relevo (DRAGUT; BLASCHKE, 2006).

Asselen e Seijmonsbergen (2006) empregaram segmentação multi-resolução, AOO e redes semânticas no mapeamento geomorfológico semi-automatizado da área de Montafon, Áustria. A segmentação foi realizada sobre o dado de declividade, extraído

de um MDE obtido de perfilamento a laser (resolução espacial de 1m). Os atributos dos objetos foram obtidos dos valores de altimetria, declividade e grade de fluxo acumulado (indica potenciais cursos pluviais e fluviais), também extraída do MDE. A legenda apresentou as seguintes classes: terraço fluvial, leque aluvial, vertentes com movimentos de massa, tálus, escarpas rochosas, formas glaciais, canais rasos entalhados e canais profundos entalhados. O mapa obtido foi comparado a um mapa geomorfológico detalhado (em escala compatível) gerado por interpretação visual. As estatísticas apontaram adequada concordância entre os mapas.

Dragut e Blaschke, (2006) também utilizaram segmentação multi-resolução, AOO e redes semânticas na classificação automática de elementos do relevo (*landform elements*). A proposta desses autores foi a de mapeamento de unidades geomorfométricas, diferindo, assim, do trabalho anterior. A segmentação foi realizada usando as variáveis altimetria, declividade, altitude relativa e curvaturas vertical e horizontal. Foram obtidas nove classes a partir de atributos extraídos das variáveis mencionadas e da aplicação de funções *fuzzy* de pertinência. A metodologia foi empregada em duas áreas teste: uma localizada na planície da Transilvânia (Romênia) e outra nos Alpes (em território alemão). Os resultados indicam adequada adaptação da metodologia em diferentes áreas e em diferentes tipos de dados (resolução espacial etc.).

2.3 Segmentação de imagens de Sensoriamento Remoto

Desde a década de 1980, aproximadamente, algoritmos de segmentação são utilizados em atividades de processamento de imagens (MUÑOZ et al., 2003). A incorporação tardia do procedimento de segmentação pelas pesquisas em Sensoriamento Remoto foi ocasionada pela complexidade das imagens fornecidas pelos sensores. Essas apresentam objetos com geometria variada e são obtidas em diversas bandas do espectro eletromagnético. Nesse contexto, até meados da década de 1990, não havia algoritmos e recursos computacionais adequados para a segmentação de imagens de Sensoriamento Remoto (SCHIEWE et al., 2001). Atualmente, há diversos aplicativos de processamento

de imagens de Sensoriamento Remoto, comerciais e livres, que incorporam algoritmos de segmentação (MEINEL; NEUBERT, 2004).

Os algoritmos existentes são subdivididos em três grandes grupos: aqueles que se baseiam no crescimento de regiões, aqueles que empregam detecção de bordas e aqueles que combinam os dois procedimentos, denominados híbridos (MUÑOZ et al., 2003). Os algoritmos de crescimento de regiões realizam a seleção de *pixels* “sementes”, aos quais são incorporados *pixels* adjacentes semelhantes para a formação de objetos bidimensionais, uniformes e disjuntos. A uniformidade é testada para se verificar a necessidade de divisão ou agrupamento de regiões. Os algoritmos de detecção de bordas verificam o gradiente das imagens com o intuito de identificar feições lineares que delimitem *pixels* homogêneos (BINS et al., 1996) (INPE, 2006). Com relação aos algoritmos híbridos, estes podem ser subdivididos em dois grupos: os que empregam integração combinada e os que empregam integração pós-processamento (MUÑOZ et al., 2003).

A integração combinada consiste na aplicação de um procedimento de crescimento de regiões apoiada em um procedimento de detecção de bordas previamente realizado. Com relação à integração pós-processamento, esta emprega fusão ou ajuste dos resultados obtidos, isoladamente, por ambos os procedimentos (detecção de bordas e crescimento de regiões) (MUÑOZ et al., 2003).

Dentre os algoritmos que compõem o primeiro subconjunto (integração combinada), destaca-se o de detecção de bacias (*watershed*), que simula gradientes topográficos na imagem para a identificação de limites (“divisores d’água”) que posteriormente são “submersos” (crescimento de regiões) (INPE, 2006). No segundo subconjunto, destaca-se o algoritmo de segmentação multi-resolução, que promove o ajuste das bordas através da interação de segmentações em diferentes níveis de escala e de resolução (MUÑOZ et al., 2003). O algoritmo do sistema de classificação utilizado nesta pesquisa emprega o procedimento de crescimento de regiões e segmentação multi-resolução (MEINEL et al., 2004; DEFINIENS, 2006).

Esse algoritmo realiza um procedimento de otimização heurística, que minimiza a heterogeneidade média dos objetos de imagem em uma dada resolução ou escala. As

principais variáveis empregadas são: fator de escala e composição de homogeneidade. A última é dividida em cor e forma. Esta, por sua vez, está subdividida em compacidade e suavidade. A escala define o tamanho dos objetos de imagem em cada nível de resolução, e a composição de homogeneidade testa a igualdade entre esses (BENZ et al., 2004; DEFINIENS, 2006).

A composição de homogeneidade (f) é definida pela Equação (2.7), em que w representa o peso definido para a variável (cor ou forma) em cada nível de segmentação, Δh_{color} a diferença espectral e Δh_{shape} um valor que descreve o incremento da forma.

$$f = w_{color} \cdot \Delta h_{color} + w_{shape} \cdot \Delta h_{shape} \quad (2.7)$$

Os incrementos das variáveis são definidos pelas equações (2.8) e (2.9). Na Equação (2.8), n_{merge} consiste no número de *pixels* dos objetos agrupados; n_{obj_1} e n_{obj_2} , nos números de *pixels* agrupados em cada objeto analisado, e $\sigma_{c,merge}$, σ_{c,obj_1} , σ_{c,obj_2} , respectivamente, nos desvios padrão do agrupamento de objetos e dos objetos isolados. Cabe destacar que w_c é o peso atribuído a um nível de segmentação de uma dada banda ou canal espectral.

$$\Delta h_{color} = \sum_c w_c (n_{merge} \cdot \sigma_{c,merge} - (n_{obj_1} \cdot \sigma_{c,obj_1} + n_{obj_2} \cdot \sigma_{c,obj_2})) \quad (2.8)$$

Na Equação (2.9), w_{compt} e w_{smooth} são os pesos, respectivamente, de compacidade e suavidade. As variações da forma são dadas por Δh_{compt} e Δh_{smooth} .

$$\Delta h_{shape} = w_{compt} \cdot \Delta h_{compt} + w_{smooth} \cdot \Delta h_{smooth} \quad (2.9)$$

As variáveis da Equação (2.9) são definidas nas Equações (2.10) e (2.11), em que l representa o perímetro do objeto, e b , o perímetro do retângulo envolvente deste (*bounding box*).

$$\Delta h_{\text{smooth}} = n_{\text{merge}} \cdot \frac{l_{\text{merge}}}{b_{\text{merge}}} - \left(n_{\text{obj}_1} \cdot \frac{l_{\text{obj}_1}}{b_{\text{obj}_1}} + n_{\text{obj}_2} \cdot \frac{l_{\text{obj}_2}}{b_{\text{obj}_2}} \right) \quad (2.10)$$

$$\Delta h_{\text{compt}} = n_{\text{merge}} \cdot \frac{l_{\text{merge}}}{\sqrt{n_{\text{merge}}}} - \left(n_{\text{obj}_1} \cdot \frac{l_{\text{obj}_1}}{\sqrt{n_{\text{obj}_1}}} + n_{\text{obj}_2} \cdot \frac{l_{\text{obj}_2}}{\sqrt{n_{\text{obj}_2}}} \right) \quad (2.11)$$

2.4 Geração de MDEs e ortorretificação de imagens orbitais

2.4.1 Geração de MDEs de imagens estereoscópicas orbitais

Segundo Toutin (2001; 2002; 2004b; 2006b), o processo de geração de um MDE a partir de imagens estereoscópicas orbitais é constituído de quatro etapas fundamentais:

1. A aquisição de imagens estereoscópicas com dados de efemérides e atitude da plataforma.
2. Cálculo de um modelo matemático 3D para a remoção das distorções geométricas.
3. Extração das paralaxes e cálculo das coordenadas cartográficas 3D (E, N e H).
4. Geração e edição da grade regular final do MDE.

Com relação à primeira etapa, há duas soluções possíveis para se obter estereoscopia em imagens de sensores orbitais (TOUTIN, 2001):

- a) estereoscopia entre duas órbitas distintas (*across-track stereoscopy*), a partir da área de sobreposição entre as imagens;
- b) estereoscopia ao longo da trajetória da plataforma (*along-track stereoscopy*), a partir da mesma órbita e utilizando imagens com sobreposição e geometria de visada adequadas.

A primeira alternativa tem sido utilizada desde a década de 1980: (i) a partir de órbitas adjacentes com os dados dos sensores a bordo das plataformas Landsat (*Multi-Spectral Scanner - MSS e Thematic Mapper - TM*); (ii) através de mecanismos de movimentação

do sensor para obtenção de visada lateral na série de plataformas SPOT (1 a 4), e (iii) com recursos de movimentação da plataforma no caso dos satélites IRS-1C, IRS1-D (TOUTIN, 2001) e CBERS 2B (INPE, 2007). A estereoscopia ao longo da trajetória da plataforma, mais recente, é realizada tanto por meio de câmeras de retro-visada, como no caso dos sistemas sensores ASTER (ABRAMS et al., 2007), IRS-P5 (TOUTIN, 2001) e PRISM (IGARASHI, 2001), bem como por meio de movimentação da plataforma, a exemplo dos sistemas QuickBird e IKONOS (BUYUKSALIH; JACOBSEN, 2007; SANDAU, 2007). A estereoscopia ao longo da trajetória da plataforma não apresenta limitações na correlação (temporal) entre as imagens, freqüente na estereoscopia entre duas órbitas distintas (TOUTIN, 2001).

Um aspecto importante na obtenção de imagens estéreo é a relação Base/Altura (B/H). A Base representa a distância no terreno compreendida entre as distintas visadas das imagens, a qual é definida a partir da altura da plataforma e do ângulo de intersecção entre as linhas de visada. A Altura consiste na distância entre a plataforma e a superfície terrestre. Na geração de MDEs que atendam às exigências de mapeamento topográfico, devem-se empregar valores de B/H entre 0,6 e 1,2. Valores neste intervalo possibilitam ao modelo estereoscópico exagero vertical elevado e, conseqüentemente, aumento na magnitude das paralaxes. Com isso, as diferenças de elevação mais sutis podem ser medidas, e se incrementa a acurácia do MDE (TOUTIN, 2001).

A correção das distorções geométricas, apontadas na etapa 2, deve ser realizada a partir de um modelo físico/determinístico 3D que considere todos os tipos de distorções oriundas da geometria de visada do sensor. Neste sentido, devem-se tratar as distorções ocasionadas pela movimentação do sensor e por variações na atitude da plataforma, as distorções decorrentes da rotação terrestre e, por fim, aquelas relacionadas às projeções cartográficas (TOUTIN, 2001; 2002; 2004a; 2006a).

Neste trabalho, foi utilizado o modelo físico/determinístico 3D do Centro Canadense de Sensoriamento Remoto (*Canada Centre for Remote Sensing - CCRS*), implementado no módulo OrthoEngine 10.0.3 da PCI Geomatics. Esse modelo se baseia nas condições e equações de colinearidade (para imagens individuais) e coplanaridade (para imagens estéreo), oriundas da fotogrametria (TOUTIN, 2004a; 2006a). Sabendo-se que os

parâmetros dos modelos para as correções individuais (sensor/plataforma; rotação da terra e projeção cartográfica) são correlacionados, o modelo do CCRS reduz esses parâmetros a um conjunto descorrelacionado, a partir dos quais realiza, simultaneamente, todas essas correções (TOUTIN, 2004a). A acurácia posicional do modelo é aumentada com o uso de pontos de controle no terreno, os quais são empregados em um procedimento iterativo de refinamento dos parâmetros através de ajuste pelo método dos mínimos quadrados. Inicialmente, quatro pontos de controle são exigidos para o cálculo do modelo (TOUTIN, 2002; 2004a; 2004b; 2006a).

A etapa 3 pode ser realizada através dos métodos visual e automático. O método visual consiste em uma extensão dos procedimentos fotogramétricos tradicionais de extração de curvas de nível e pontos cotados em um equipamento restituidor estéreo. O outro método emprega um procedimento automático de reconhecimento de padrões em imagens para identificação de feições homólogas e extração de paralaxes. Essa automação pode ser realizada a partir de três modos: com base nos valores de nível de cinza das imagens, com base nas feições das imagens, bem como de forma híbrida (combinação dos dois primeiros modos). O primeiro modo, mais acurado, é o mais empregado. De forma a facilitar o desempenho computacional da extração das paralaxes, as imagens corrigidas na etapa 2 são convertidas em uma geometria epipolar ou quase-epipolar (com uma orientação comum), nas quais apenas as paralaxes no eixo X são mantidas. Estas representam 98% do total de paralaxes em um par estéreo (TOUTIN, 2001). A Figura 2.3 apresenta as diferenças entre as geometrias das imagens brutas e epipolares ou quase-epipolares.

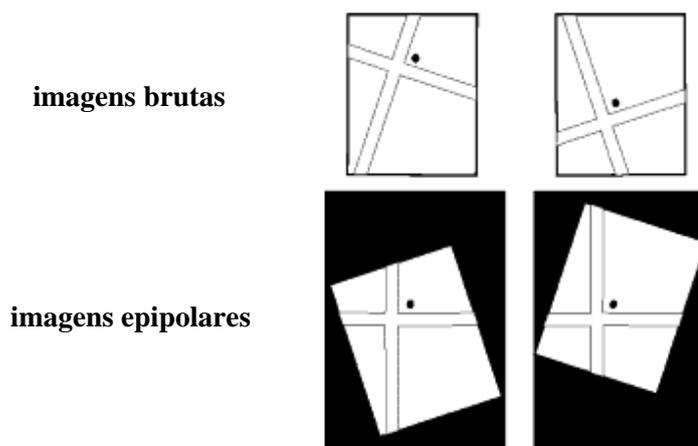


Figura 2.3 – Imagens brutas e imagens epipolares.
 Fonte: PCI (2003).

Na extração automática de paralaxes com base nos valores de nível de cinza, a maioria dos aplicativos utiliza janelas de busca e de correlação. Inicialmente, a imagem obtida na visada nadir é denominada de imagem correlação, e a imagem obtida na obliqua é denominada de imagem de busca. Estabelecido isto, uma janela (geralmente 11x11 *pixels*) é fixada na imagem de busca, e uma janela menor é fixada na imagem correlação, denominadas, respectivamente, janela de busca e janela de correlação. O *pixel* central da janela de correlação ocupa as mesmas coordenadas do *pixel* central da janela de busca. Posteriormente, a janela de correlação realiza a busca dos *pixels* mais correlacionados entre as duas imagens e que estão compreendidos pela janela de busca. Localizados os *pixels*, calculam-se as diferenças em coordenadas e, conseqüentemente, as paralaxes (EHLERS; WELCH, 1987). A medida de correlação mais utilizada é o coeficiente normalizado de correlação cruzada, detalhado em (RUSS, 1998). Os valores de altitude são obtidos através do emprego da Equação (2.12).

$$\Delta h = \frac{\Delta p}{B} = \Delta p \frac{H}{B} \quad , \quad (2.12)$$

em que Δh representa a diferença de altitude; Δp , a diferença fornecida pela paralaxe; B, a Base, e H, a Altura da plataforma (EHLERS; WELCH, 1987; WELCH et al., 1998).

A última etapa consiste no emprego de rotinas de pós-processamento, tais como preenchimento de áreas sem dados, remoção de artefatos etc. Geralmente, filtragens são utilizadas (TOUTIN, 2001). Na seqüência, Seção 2.4.2, apresenta-se uma breve definição do processo de ortorretificação de imagens orbitais.

2.4.2 Ortorretificação de imagens orbitais

Ortorretificação consiste no emprego de um modelo matemático e um MDE para corrigir distorções em imagens orbitais brutas. Modelos físicos/determinísticos 3D (descritos na Seção 2.4.1) estabelecem a posição e orientação do sistema sensor na aquisição das imagens e, desse modo, consideram um conjunto de distorções geométricas conhecidas. Com essas informações, a posição correta dos *pixels* em relação ao terreno pode ser estabelecida (PCI, 2003; TOUTIN, 2004a).

Modelos empíricos, tais como funções polinomiais 2D/3D e funções racionais, também são utilizados na ortorretificação de imagens orbitais. Esses modelos apresentam a desvantagem de não considerarem parâmetros físicos da geometria de visada (TOUTIN, 2004a). Neste trabalho, utilizou-se o modelo do CCRS, também detalhado na Seção 2.4.1.

2.5 Avaliação da acurácia posicional de MDEs

Nesta seção, são apresentados os aspectos teóricos de dois métodos de avaliação da acurácia posicional de MDEs: (i) análise da exatidão (GALO; CAMARGO, 1994) e (ii) acurácia vertical relativa (GESCH, 2007).

2.5.1 Análise da exatidão

A análise da exatidão é constituída dos testes de tendência e de precisão (GALO; CAMARGO, 1994). Ambos se apóiam nos valores de discrepâncias entre as coordenadas dos produtos gerados e as coordenadas de referência (base cartográfica e/ou pontos GPS), calculadas para cada ponto *i* por:

$$\Delta X_i = X_i - X_i^r, \quad (2.13)$$

em que X_i são os pontos do produto a ser validado, e X_i^r , os pontos de referência.

A média e a variância das diferenças amostrais são, respectivamente, calculadas por:

$$\Delta \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta x_i \quad (2.14)$$

e

$$S_{\Delta X}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta x_i - \Delta \bar{X})^2 \quad (2.15)$$

Desse modo, a partir dos valores de discrepância obtidos por amostras, aplica-se uma análise estatística composta dos testes de hipóteses “t” de *Student* e Qui-quadrado. O teste “t” permite verificar se a média das discrepâncias é igual a zero e indica a ocorrência de tendência ou deslocamento sistemático. Nesse teste, são avaliadas as seguintes hipóteses:

$$H_0 : \Delta \bar{X} = 0, \text{ contra}$$

$$H_1 : \Delta \bar{X} \neq 0$$

Esse teste exige o cálculo da estatística amostral “t” e do seu respectivo intervalo de confiança. Deve-se verificar se o valor de “t” amostral se encontra no intervalo de aceitação ou rejeição da hipótese nula. O valor de “t” amostral é calculado a partir da seguinte expressão:

$$t_x = \frac{\Delta \bar{X}}{S_{\Delta X}} \sqrt{n} \quad (2.16)$$

O intervalo de confiança é calculado por:

$$|t_x| < t_{(n-1, \alpha/2)}, \quad (2.17)$$

em que $\Delta \bar{X}$ representa a média das discrepâncias; $S_{\Delta X}$, o desvio-padrão amostral, e α , o nível de significância do teste. A tendência, se verificada, pode ser corrigida através da subtração do seu valor em cada coordenada do produto testado (GALO; CAMARGO, 1994).

O teste Qui-Quadrado mostra se as variâncias amostral e a obtida a partir do erro padrão (definido por órgão nacional competente) são iguais. Esse teste indica o grau de dispersão dos erros e, por conseguinte, a precisão (GALO; CAMARGO, 1994). As hipóteses avaliadas são as seguintes:

$$H_0 : S_{\Delta X}^2 = \sigma_X^2, \text{ contra}$$

$$H_1 : S_{\Delta X}^2 > \sigma_X^2$$

O termo $S_{\Delta X}^2$ representa o quadrado do desvio-padrão amostral, e σ_X^2 , o quadrado do erro padrão. Como se trata de uma resultante, no caso da planimetria, deve-se dividir o erro padrão por $\sqrt{2}$. A partir da variância amostral, calcula-se a seguinte estatística:

$$\chi_x^2 = (n-1) \frac{S_{\Delta X}^2}{\sigma_X^2} \quad (2.18)$$

Posteriormente, deve-se verificar se o valor calculado se encontra no intervalo de aceitação da hipótese nula, como indicado na Equação (2.19). Caso o valor não se encontre no intervalo estabelecido, rejeita-se a hipótese nula, ou seja, o produto não atende à precisão pré-estabelecida.

$$\chi_x^2 \leq \chi_{(n-1, \alpha)}^2 \quad (2.19)$$

2.5.2 Acurácia vertical relativa

Segundo Gesch (2007), a acurácia vertical relativa é uma medida dos erros aleatórios do MDE e pode ser obtida do módulo da subtração entre as diferenças (ponto a ponto) da referência e do MDE, conforme a Equação (2.20).

$$RV = |\Delta_{\text{ref}} - \Delta_{\text{MDE}}| , \quad (2.20)$$

em que Δ_{ref} é a diferença de elevação entre dois pontos na referência e, Δ_{MDE} , a diferença de elevação entre esses mesmos dois pontos no MDE. Todas as combinações possíveis entre pontos são calculadas, e as diferenças (na referência e no MDE) são obtidas a partir de pares de pontos únicos. Esse método é útil na avaliação da qualidade de MDEs destinados à geração de produtos derivados que empregam as diferenças entre valores de elevação adjacentes, tais como declividade, orientação de vertentes etc. (GESCH, 2007). A Figura 2.4 ilustra os componentes da Equação (2.20).

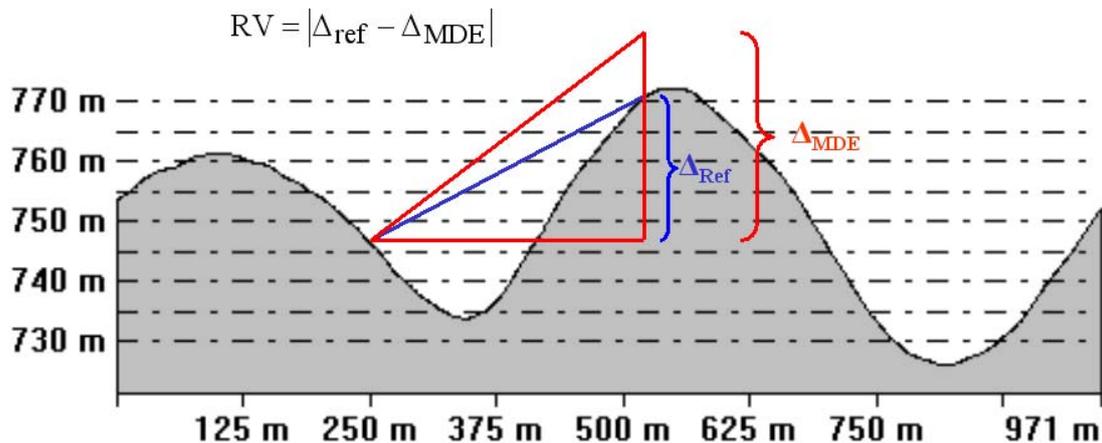


Figura 2.4 – Exemplo hipotético dos componentes utilizados no cálculo da acurácia vertical relativa.

2.6 Variáveis geomorfológicas

Shary et al. (2002) propõem um sistema de classificação para as variáveis geomorfológicas (VGs) constituído de quatro classes (A, B, C e D). Duas superclasses, VGs locais e VGs regionais, são subdivididas nas subclasses campo específico (*field-specific*) e campo invariante (*field-invariant*). As VGs locais são aquelas obtidas de operações de vizinhança com janelas móveis (filtros) de tamanhos pré-estabelecidos. Por outro lado, as VGs regionais utilizam janelas móveis flexíveis cujas dimensões são alteradas durante a busca de feições geomorfológicas. Com relação às subclasses, a de campo específico agrupa VGs que têm relação com grandezas geofísicas vetoriais (gravidade, irradiação solar etc.) e campo invariante agrupa VGs que não apresentam associação com qualquer dessas grandezas, apenas descrevem quantitativamente o terreno. O Quadro 4.1 apresenta as classes de VGs.

Variáveis Geomorfológicas	Locais	Regionais
Campo específico	A	B
Campo invariante	C	D

Quadro 4.1 – Classes de variáveis geomorfológicas.
Fonte: Shary et al. (2002).

Nesta pesquisa, são utilizadas as seguintes VGs: (i) declividade, (ii) orientação de vertentes, (iii) curvatura vertical e (iv) curvatura horizontal. Declividade e orientação de vertentes são as duas componentes do vetor obtido da primeira derivação da superfície. A segunda derivação fornece as curvaturas horizontal e vertical da superfície (VALERIANO, 2003; VALERIANO; CARVALHO Jr., 2003).

Essas VGs são do tipo A (locais e de campo específico), sendo que o item (ii) está relacionado à irradiação solar, e os demais itens, à aceleração da gravidade (SHARY et al., 2002). Na Tabela 2.1, as fórmulas para o cálculo das VGs são apresentadas e, abaixo, seguem as definições dessas variáveis:

- a) Declividade: consiste no ângulo entre os planos tangente e horizontal em um determinado ponto da superfície terrestre, e seus valores são apresentados em graus ou porcentagens (FLORINSKY, 2005).

- b) Orientação de vertentes: representa a direção azimutal da rampa no plano horizontal, fornecida em graus (SHARY, 2007).
- c) Curvatura vertical: evidencia áreas de aceleração e desaceleração gravitacional a partir da caracterização das vertentes em tipos côncavo (valores negativos), convexo (valores positivos) ou retilíneo (valores nulos) (SHARY, 2007).
- d) Curvatura horizontal: destaca as linhas de convergência (valores negativos) e divergência (valores positivos) do escoamento superficial (SHARY, 2007).

Tabela 2.1 – Variáveis geomorfométricas utilizadas.

Variável Geomorfométrica	Fórmulas
Declividade (G) (°)	$G = \arctan \sqrt{p^2 + q^2}$
Orientação de vertentes (A) (°)	$A = \arctan \frac{q}{p}$
Curvatura vertical (k_v) (m^{-1})	$k_v = -\frac{p^2 r + 2pqs + q^2 t}{(p^2 + q^2)\sqrt{(1 + p^2 + q^2)^3}}$
Curvatura horizontal (k_h) (m^{-1})	$k_h = -\frac{q^2 r - 2pqs + p^2 t}{(p^2 + q^2)\sqrt{1 + p^2 + q^2}}$

*Onde: $p = \frac{\partial z}{\partial x}$; $q = \frac{\partial z}{\partial y}$; $r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$; $s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$ e $t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$

Fonte: Florinsky (2005).

2.7 Variáveis texturais

Textura é um elemento importante na identificação de objetos e regiões em uma imagem. De modo diferente dos atributos espectrais, os quais descrevem a variação tonal média, os atributos texturais contêm informação sobre a distribuição espacial dessas variações na imagem (PCI, 2003).

Há vários métodos matemáticos para a mensuração de atributos texturais. O mais empregado se baseia na matriz de co-ocorrência dos níveis de cinza (*grey level co-*

occurrence matrix – GLCM). O método GLCM consiste em um histograma bi-dimensional dos níveis de cinza de um par de *pixels*, os quais são separados por uma relação espacial fixa (PCI, 2003). Esse método aproxima a distribuição de probabilidade conjunta de um par de *pixels* dados dois parâmetros, δ (distância entre *pixels*) e θ (orientação). A probabilidade pode ser definida como (CLAUSI, 2002):

$$\Pr_{(x)} = \{P_{i,j}/(\delta, \theta)\} \quad (2.21)$$

Em que, $P_{i,j}$, a probabilidade de co-ocorrência no *pixel* i,j , é definida como:

$$P_{i,j} = \frac{V_{i,j}}{\sum_{i,j=0}^{N-1} V_{i,j}} \dots, \quad (2.22)$$

em que $V_{i,j}$ representa o valor em cada *pixel*, e N , o número de linhas e colunas da matriz.

A maioria das medidas de textura são computadas diretamente da matriz de co-ocorrência. Porém, algumas medidas de textura são obtidas de um vetor de diferença de nível de cinza (*grey level difference vector* - GLDV), o qual é derivado do GLCM. Ambos os métodos têm a capacidade de tratar variáveis isotrópicas e anisotrópicas. As principais medidas texturais obtidas do método GLCM são: (i) homogeneidade, (ii) contraste, (iii) dissimilaridade, (iv) média, (v) desvio padrão, (vi) entropia, (vii) segundo momento angular e (viii) correlação (PCI, 2003; DEFINIENS, 2006). A Tabela 2.2 apresenta um resumo das principais variáveis texturais obtidas do método GLCM.

Tabela 2.2 – Variáveis texturais obtidas do método GLCM.

Variável Textural	Intervalo de valores	Fórmula
Homogeneidade	[0 – 90]	$\sum_{i,j=0}^{N-1} \frac{P_{i,j}}{1 + (i - j)^2}$
Contraste	[0 – 90]	$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (i - j)^2$

(Continua)

Tabela 2.2 - Conclusão

Variável Textural	Intervalo de valores	Fórmula
Dissimilaridade	[0 – 90]	$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} i - j $
Média	[0 – 90]	$\mu_{i,j} = \frac{\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}}{N^2}$
Desvio Padrão	[0 – 90]	$\sigma = \sqrt{\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (i, j - \mu_{i,j})^2}$
Entropia	[0 – 90]	$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} (-\ln P_{i,j})$
Segundo Momento Angular	[0 – 90]	$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j}^2$
Correlação	[0 – 90]	$\sum_{i,j=0}^{N-1} P_{i,j} \left[\frac{(i - \mu_i)(j - \mu_j)}{\sqrt{(\sigma_i^2)(\sigma_j^2)}} \right]$

*Em que, $i = n^\circ$ da linha; $j = n^\circ$ da coluna; P_{ij} = a probabilidade de co-ocorrência no *pixel* i, j e $N = n^\circ$ de linhas e colunas.

Fonte: Definiens (2006).

2.8 Avaliação da classificação

2.8.1 Matriz de erros

A matriz de erros é um recurso adequado para se avaliar classificações, pois permite a extração de uma série de medidas de acurácia. Nessa matriz, as colunas usualmente representam os dados de referência, e as linhas, a classificação obtida de dados de Sensoriamento Remoto (CONGALTON, 1991).

A partir da matriz de erros, avaliam-se as acurácias individuais, de cada categoria, por meio dos erros de inclusão (erros de comissão) e de exclusão (erros de omissão). Erro de comissão é a inclusão equivocada de uma área em uma determinada categoria, e erro de omissão é a exclusão equivocada de uma área também em uma determinada categoria. Cada erro é uma omissão de uma categoria correta e uma comissão para uma categoria errada (CONGALTON; GREEN, 1999).

Outras medidas de acurácia mais comuns são: (i) acurácia global, (ii) acurácia do produtor e (iii) acurácia do usuário. Acurácia global é a soma da diagonal principal (acertos) dividida pelo número total de amostras. Acurácia do produtor indica o desempenho da classificação e consiste no número de amostras corretamente classificadas em uma determinada classe dividido pelo número total de amostras de **referência** para essa classe. Por fim, a acurácia do usuário, a qual indica a qualidade temática do produto final, representa o número de amostras corretamente classificadas em uma determinada classe dividido pelo número total de amostras **classificadas** como essa classe (CONGALTON; GREEN, 1999). Na Tabela 2.3, exemplos de matriz de erro e acurácia global são apresentados. Na seqüência, encontram-se na Tabela 2.4 as respectivas medidas de acurácia (produtor e usuário), extraídas da tabela anterior.

As matrizes de erro são úteis também para a aplicação de técnicas estatísticas de análise, tais como, a técnica multivariada discreta Kappa. O resultado da análise Kappa é uma estatística KHAT (um estimador do Kappa), o qual é outra medida de concordância ou acurácia. Essa medida se baseia na diferença entre a concordância na matriz (diagonal principal) e a chance de concordância que é indicada pelos totais nas linhas e colunas (totais marginais) (CONGALTON, 1991; CONGALTON; GREEN, 1999):

$$\hat{K} = \frac{n \sum_{i=1}^K n_{ii} - \sum_{i=1}^K n_{i+} n_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^K n_{i+} n_{+i}}, \quad (2.23)$$

em que, n é o número total de observações; K , o número de linhas na matriz; n_{ii} , é o número de observações na linha i , coluna i ; x_{i+} e x_{+i} são os totais marginais das linhas i e coluna i , respectivamente.

Tabela 2.3 – Exemplo de matriz de erros.

		Referência				Total
		Decíduo	Coníferas	Agricultura	Arbustiva	
Classificação	Decíduo	65	4	22	24	115
	Coníferas	6	81	5	8	100
	Agricultura	0	11	85	19	115
	Arbustiva	4	7	3	90	104
	Total	75	103	115	141	434

Acurácia Global = $(65+81+85+90)/434 = 0,74$

Fonte: Adaptada de Congalton e Green (1999).

Tabela 2.4 – Medidas de acurácia extraídas da Tabela 2.4.

	Acurácia do Produtor	Acurácia do Usuário
Decíduo	$65/75 = 0,87$	$65/115 = 0,57$
Coníferas	$81/103 = 0,79$	$81/100 = 0,81$
Agricultura	$85/115 = 0,74$	$85/115 = 0,74$
Arbustiva	$90/141 = 0,64$	$90/104 = 0,87$

Fonte: Adaptada de Congalton e Green (1999).

2.8.2 Estabilidade da classificação

Segundo Steele et al. (1998), as matrizes de erros não avaliam a variabilidade espacial da acurácia em mapeamentos temáticos. Essa avaliação, segundo os autores, pode ser realizada por meio de análise probabilística ou lógica *fuzzy* e procedimentos de interpolação.

Em classificadores que empregam lógica *fuzzy*, as diferenças entre o maior e o segundo maior valor de pertinência, $\mu_A(x)$, podem ser utilizadas para se estimar a estabilidade ou confiabilidade da classificação. Quanto maior essa diferença, mais estável e confiável é a classificação (BENZ et al., 2004).

2.9 O sistema sensor ASTER

O radiômetro imageador ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*) integra a carga útil do satélite Terra. Este compõe a série de plataformas multi-instrumentos do sistema de observação do planeta Terra (EOS – *Earth Observation System*), o qual está sob responsabilidade da Agência Espacial dos Estados Unidos da América (NASA - *National Aeronautics and Space Administration*). O EOS é composto de uma componente científica e de um sistema de dados que coordenam uma série de satélites para observações globais da superfície terrestre, da atmosfera e dos oceanos. O satélite Terra está a 705 km de altitude e realiza uma órbita sol-síncrona (ABRAMS et al., 2007).

O ASTER cobre uma região espectral do visível ao infravermelho termal através de 14 bandas, distribuídas entre os subsistemas VNIR (*visible and near-infrared*), SWIR (*short wave infrared*) e TIR (*thermal infrared*). Tem, ainda, uma banda adicional (3B) no espectro do infravermelho próximo com geometria de visada de 27,7° em relação ao nadir e direcionada no sentido contrário ao deslocamento da plataforma (retro-visada). A combinação desta com a banda do espectro do infravermelho próximo no nadir (3N) fornece pares estereoscópicos (TOUTIN, 2002).

O tempo de revisita do sistema sensor é de 16 dias, e cada cena cobre uma área de 60 x 60 km. Como o tempo de imageamento é compartilhado com outros quatro sensores (CERES, MISR, MODIS e MOPITT), o seu recobrimento não é sistemático (SOUZA FILHO, 2003). A Tabela 2.5 apresenta as especificações técnicas dos instrumentos que compõem o sistema sensor ASTER.

Tabela 2.5 – Subsistemas do sensor ASTER e suas principais características.

Subsistema	Banda	Comprimento de onda (μm)	Resolução Espacial (m)	Resolução Radiométrica (bits)
VNIR	1	0,52 – 0,60	15	8
	2	0,63 – 0,69		
	3N	0,78 – 0,86		
	3B	0,78 – 0,86		
SWIR	4	1,60 – 1,70	30	8
	5	2,145 – 2,185		
	6	2,185 – 2,225		
	7	2,235 – 2,285		
	8	2,295 – 2,365		
	9	2,360 – 2,430		
TIR	10	8,125 – 8,475	90	12
	11	8,475 – 8,825		
	12	8,925 – 9,275		
	13	10,25 – 10,95		
	14	10,95 – 11,65		

Fonte: Adaptada de Abrams et al. (2007).

3 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo, com 1.098,6 km², é o município de São José dos Campos (SP), localizado no médio vale do rio Paraíba do Sul. Esse município foi selecionado para análise pelos seguintes motivos: (i) os aspectos geomorfológicos da área são amplamente documentados na literatura científica; (ii) há uma grande diversidade de unidades geomorfológicas dentro dos limites da sua fronteira político-administrativa, que compreendem categorias variadas de serras, montanhas, morros, colinas e planícies; e (iii) por fim, a sua localização próxima permite maior agilidade e comodidade nos trabalhos de campo. A Figura 3.1 apresenta sua localização.

De acordo com Kurkdjian et al. (1992) e Sousa (1998) os tipos de uso e cobertura do solo predominantes na área de estudo são: mata/capoeira, reflorestamento (predomínio do gênero *Eucalyptus spp*), pastagens, culturas temporárias (arroz, feijão e batata), portos de areia e áreas urbanizadas.



Figura 3.1 – Localização da área de estudo (MDE ASTER com aplicação da técnica de relevo sombreado).

O médio vale do rio Paraíba do Sul, por sua vez, está inserido em um sistema de montanhas constituído das Serras do Mar e da Mantiqueira. Esse sistema é a mais destacada feição orográfica da borda atlântica do continente sul-americano, e sua

história evolutiva data do Pré-Cambriano (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998). Destacam-se, em ordem cronológica, três grandes conjuntos de eventos responsáveis pela configuração fisiográfica dessa área: (i) sucessivas interações entre placas continentais (no Proterozóico) que formaram faixas móveis acrescionárias, colisionais e transpressionais (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998); (ii) geração da superfície de aplainamento Japi (entre o Cretáceo Superior e o Terciário Inferior) por meio da erosão de corpos rochosos (ígneos e metamórficos, principalmente) (ALMEIDA, 2000); e (iii) tectogênese (início no Paleógeno) e preenchimento de hemi-grábens com sedimentos cenozóicos (ALMEIDA, 2000). Essa separação é apenas uma simplificação esquemática e, em diversos momentos do tempo geológico, esses conjuntos de eventos ocorreram concomitantemente.

Esses processos definiram as características litológicas e geomorfológicas da área de estudo. Com relação à litologia, esta é composta de rochas ígneas e metamórficas dos complexos: (i) Amparo, (ii) Embu, (iii) Paraíba do Sul e (iv) Paraisópolis. Ocorrem também rochas sedimentares da formação Taubaté (Terciário Superior) e depósitos quaternários (aluviões). Nos complexos citados, predominam gnaisses (datando do Arqueano ao Proterozóico Médio) e suítes graníticas sin e pós-tectônicas (Proterozóico Superior), ambos ocasionados pelas movimentações crustais da orogênese Brasileira (Pré-Cambriano) (DNPM, 1983).

Por outro lado, em rochas cristalinas a geomorfologia da área de estudo é caracterizada por morrotes, morros e montanhas (FLORENZANO; CSORDAS, 1993). De acordo com Almeida e Carneiro (1998), planaltos e escarpas são sustentados por rochas mais resistentes, enquanto lineamentos rochosos e a rede de drenagem são condicionados por falhas, fraturas e zonas de cisalhamento. Em terrenos sedimentares, ocorrem planícies aluviais (terrenos sujeitos a inundações periódicas, ocasionados por níveis de base locais) (FLORENZANO; CSORDAS, 1993), terraços (terrenos situados acima das várzeas inundáveis) (VERDADE; HUNGRIA, 1966) e colinas terciárias (FLORENZANO; CSORDAS, 1993). Cabe destacar a ocorrência de diversos padrões de alvéolos ou planícies aluviais intermontanas de menor porte. Verdade e Hungria (1966), verificaram a existência de dois níveis de terraços fluviais na margem direita (sudoeste) do Rio

Paraíba do Sul. Isso ocorre devido à tendência do rio em se deslocar no sentido noroeste (VERDADE; HUNGRIA, 1966), ocasionada pela inclinação norte-noroeste do hemigrabem (ALMEIDA, 2000).

Com relação aos aspectos morfométricos, os valores de amplitude altimétrica, dissecação do relevo e declividades são baixos nas planícies aluviais e aumentam progressivamente a partir das classes terraços, colinas, morrotes, morros e montanhas (FLORENZANO; CSORDAS, 1993).

Ainda, outro elemento importante da área de estudo é a pedologia. O mosaico pedológico é constituído de Gleissolos Melânicos, Latossolos Vermelho-Amarelos e Argissolos Vermelho-Amarelos, principalmente (OLIVEIRA et al., 1999). Com relação aos processos pedogenéticos, os Gleissolos Melânicos se originam em terrenos sedimentares aluviais com baixas declividades e lençol freático a pouca profundidade. Essas condições ocasionam ambiente redutor e preservação da matéria orgânica. Latossolos Vermelho-Amarelos são solos tropicais constituídos basicamente por material mineral, os quais se localizam em terrenos com baixa a média declividade, apresentam boa drenagem e horizonte B profundo. Argissolos Vermelho-Amarelos também são solos tropicais com predominância de constituintes minerais. Ocorrem em terrenos com média a alta declividade e apresentam horizonte B argiloso (OLIVEIRA, 1999).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Material

O material utilizado é composto de: (i) imagens ASTER do subsistema VNIR (bandas 1, 2, 3N e 3B); (ii) arquivo vetorial de eixo de logradouros; (iii) arquivo vetorial da rede hidrográfica; (iv) arquivos vetoriais de curvas de nível; (v) arquivos de pontos cotados, (vi) arquivos vetoriais com a delimitação das unidades geotécnicas; (vii) arquivos com coordenadas (E, N e H), de 109 pontos GPS, e (viii) equipamentos para visualização estereoscópica Zscreen 2000 (monitor e óculos).

As imagens ASTER (item i), de 31/08/2004, foram cedidas pelo Dr. Carlos Roberto de Souza Filho (IG-UNICAMP). Essas se encontram no nível de processamento L1B (georreferenciadas e com calibração radiométrica). Os arquivos vetoriais (itens ii a vi), na escala 1:10.000, compõem o banco de dados geográficos “Cidade Viva”, o qual é disponibilizado gratuitamente pela Prefeitura Municipal de São José dos Campos (SP) (PMSJC). As coordenadas GPS (item vii), obtidas de receptores geodésicos e com altitudes ortométricas (referenciadas ao geóide), foram obtidas junto aos seguintes órgãos: Instituto de Estudos Avançados da Aeronáutica (IEAv), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e Fundação de Ciência, Aplicações e Tecnologia Espaciais (FUNCATE). Por fim, os equipamentos ZScreen 2000 foram disponibilizados pelo INPE (unidade de São José dos Campos/SP). Esses permitem a estereoscopia por meio da polarização da radiação visível (detalhes na Seção 2.1.2). O Quadro 4.2 apresenta a relação do material utilizado.

As imagens ASTER estão referenciadas ao *datum* horizontal WGS 84, projeção UTM. Por outro lado, os arquivos vetoriais e as coordenadas GPS estão referenciados ao *datum* horizontal SAD69/Brasil, projeção UTM.

Material	Fonte/Fabricante
Imagens ASTER	NASA
arquivo vetorial de eixo de logradouros	PMSJC
arquivo vetorial da rede hidrográfica	PMSJC
arquivos vetoriais de curvas de nível	PMSJC
arquivos de pontos cotados	PMSJC
arquivo vetorial das unidades geotécnicas	PMSJC
109 pontos GPS (coordenadas E, N e H)	IEAv; INPE e FUNCATE
Equipamentos ZScreen 2000	VRLOGIC

Quadro 4.2 - Relação do material utilizado.

Camargo et al. (2007) avaliaram a acurácia planimétrica da base de eixo de logradouros e a acurácia altimétrica do MDE obtido dos arquivos vetoriais de curvas de nível e pontos cotados. De acordo com esses autores, a base de eixo de logradouros atende ao Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) classe A, escala 1:10.000, e o MDE, ao PEC classe A, escala 1:50.000.

Com relação aos aplicativos, foram empregados os pacotes de processamento de imagens PCI Geomatica 10.0.3 e ENVI 4.3; o SIG SPRING 4.3; a plataforma orientada a objeto de interpretação de imagens Definiens Professional 5.0 e a plataforma MatLab 7 (ambiente interativo de computação envolvendo matrizes). O Quadro 4.3 apresenta a relação de aplicativos utilizados.

Aplicativos	Desenvolvedor
PCI Geomatica 10.0.3	PCI Geomatics
ENVI 4.3	ITT Visual Information Solutions
SIG SPRING 4.3	INPE
Definiens Professional 5.0	Definiens
MatLab 7	MathWorks

Quadro 4.3 – Relação de aplicativos utilizados.

4.2 Métodos

A seqüência dos procedimentos metodológicos e os principais dados gerados estão esquematizados na Figura 4.1. Nas seções seguintes, esses procedimentos são descritos detalhadamente.

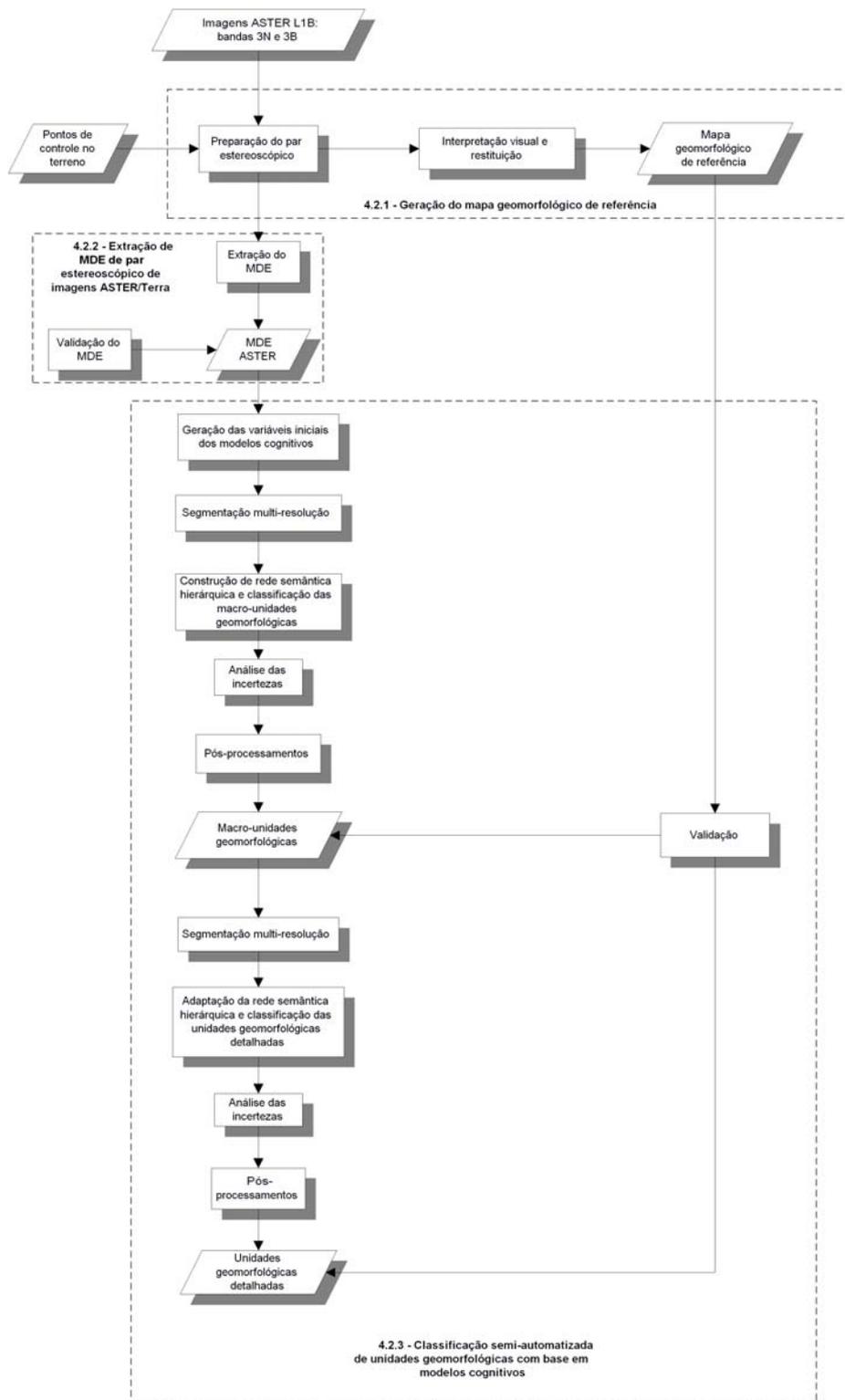


Figura 4.1 – Fluxograma dos procedimentos metodológicos.

4.2.1 Geração do mapa geomorfológico de referência

Devido à inexistência de mapas geomorfológicos em escalas compatíveis à dos dados ASTER (1:50.000 a 1:100.000), elaborou-se um mapa geomorfológico a partir de procedimentos de interpretação visual (Seções 4.2.1.1 e 4.2.1.2). Utilizou-se o par estereoscópico de imagens ASTER (imagens 3N e 3B) e uma estação 3D digital. Esse mapa foi empregado como referência na avaliação dos resultados gerados pelos procedimentos semi-automatizados de classificação (Seções 5.3 e 5.4), e foi referendado por intérprete especializado em Geomorfologia, de forma a evitar o viés na elaboração de tal referência exclusivamente por parte do autor.

4.2.1.1 Preparação de par estereoscópico de imagens ASTER em estação digital 3D

Nessa etapa, foram realizadas a orientação do par estéreo de imagens ASTER e a geração das imagens epipolares (aspectos teóricos detalhados na Seção 2.4.1). Para a orientação, utilizaram-se os dados de efemérides e atitude do sistema sensor ASTER (disponíveis nos metadados das imagens), 43 pontos de controle 3D no terreno (*Ground Control Points* – GCPs) e 90 pontos de amarração 2D (*Tie Points* – TPs).

Os GCPs foram obtidos na base de eixo de logradouros (coordenadas E e N) e no MDE (coordenada H) gerado com os arquivos de curvas de nível e pontos cotados. Esses pontos foram coletados, inicialmente, na imagem 3N e depois transferidos para a imagem 3B. Os TPs são pontos homólogos, coletados simultaneamente entre as imagens do par estéreo, para dar maior rigidez ao modelo.

Com base nesse conjunto de dados, realizou-se o ajuste do modelo 3D do CCRS (detalhes sobre o modelo na Seção 2.4.1), pelo método dos mínimos quadrados. A Figura 4.2 destaca a sobreposição entre as imagens do par estéreo e, também, a distribuição dos GCPs e TPs. Na Tabela 4.1, é apresentado um resumo das características do modelo ajustado.

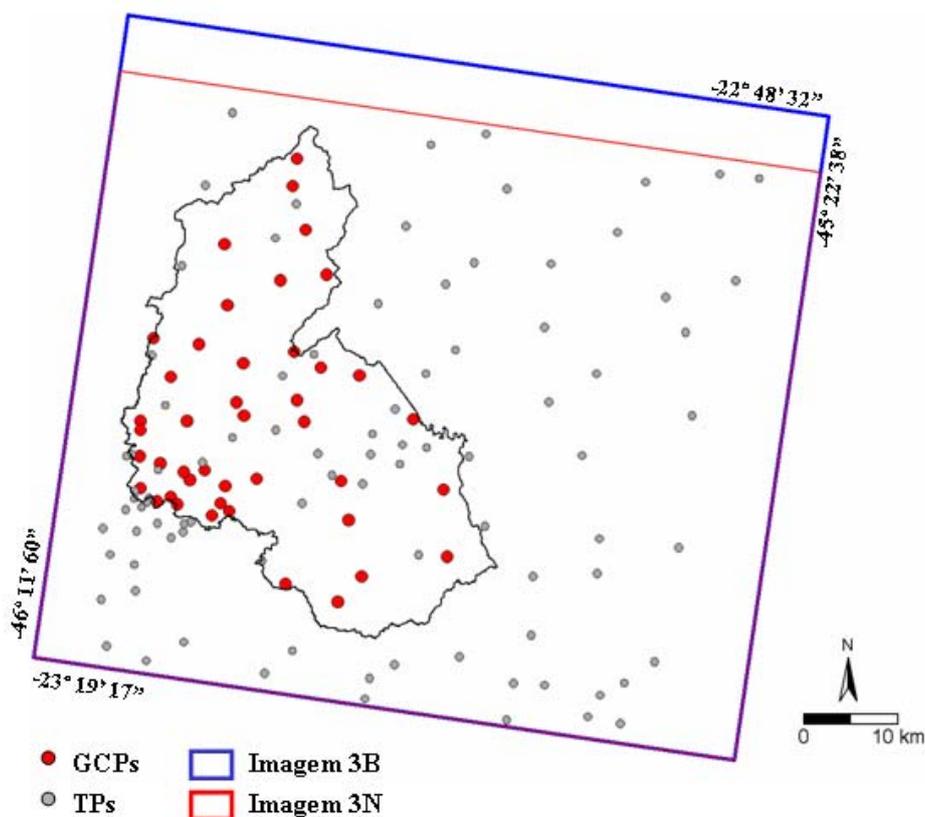


Figura 4.2 – Cobertura das imagens do par estéreo e distribuição dos GCPs e TPs.

Tabela 4.1 – Resumo das características do modelo ajustado.

	Nº de pontos de controle	Nº de pontos de amarração	Erro médio quadrático dos pontos de controle (m)
MDE ASTER	43	90	2,68

Na Figura 4.2, observa-se que os GCPs estão concentrados na porção oeste do par estéreo, devido à base de eixo de logradouros que não cobre toda a área das cenas. De acordo com Toutin (2004a), a distribuição homogênea dos GCPs é fundamental somente em modelos empíricos 2D/3D (funções polinomiais), pois esses não consideram a geometria de imageamento do sistema sensor e, por conseguinte, são precisos localmente (no ponto). No modelo CCRS, os TPs são utilizados para o adensamento dos pontos de controle.

Outro aspecto importante é a quantidade de GCPs utilizada. Apesar de que um mínimo de quatro pontos já seja suficiente para o ajuste do modelo CCRS, a coleta de uma quantidade maior de pontos possibilita a sobre-determinação do sistema de equações

(mais equações do que incógnitas) e minimiza os erros inerentes à fonte de GCPs e os de pontaria (durante a identificação e coleta de pontos pelo analista) (TOUTIN, 2002; 2004a; 2004b; 2006a). Desse modo, nessa etapa, coletaram-se mais pontos do que necessário, para minimizar a imprecisão na identificação de pontos em áreas montanhosas com uso do solo rural (adjacências da Serra da Mantiqueira). Na seqüência, são apresentadas as imagens epipolares (Figuras 4.3 e 4.4) geradas para a interpretação visual 3D (detalhada na Seção 4.2.1.2) e para a extração do MDE (detalhada na Seção 4.2.2). Aspectos teóricos sobre as imagens epipolares são apresentados na Seção 2.4.1.

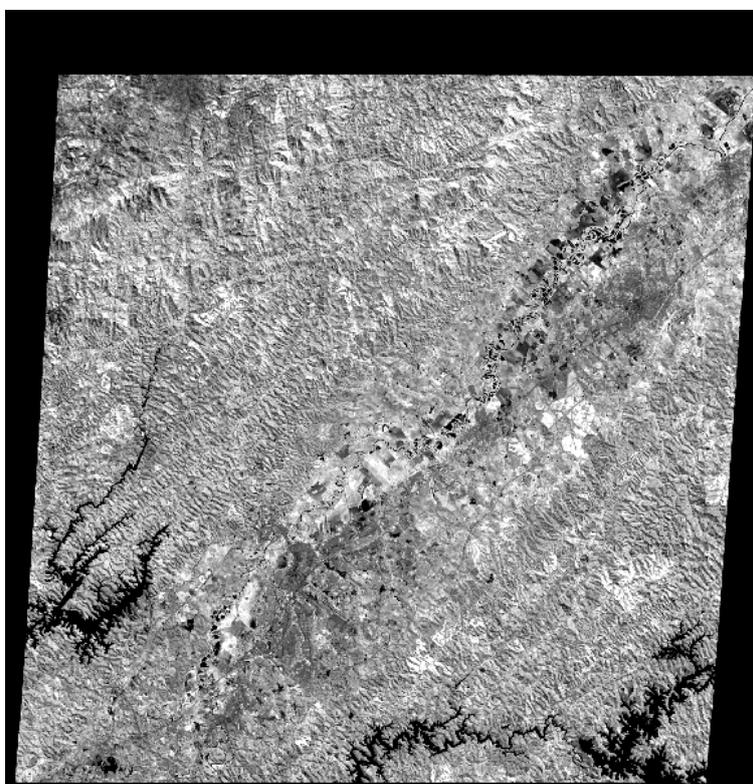


Figura 4.3 – Imagem epipolar esquerda gerada da banda 3N do sistema sensor ASTER.

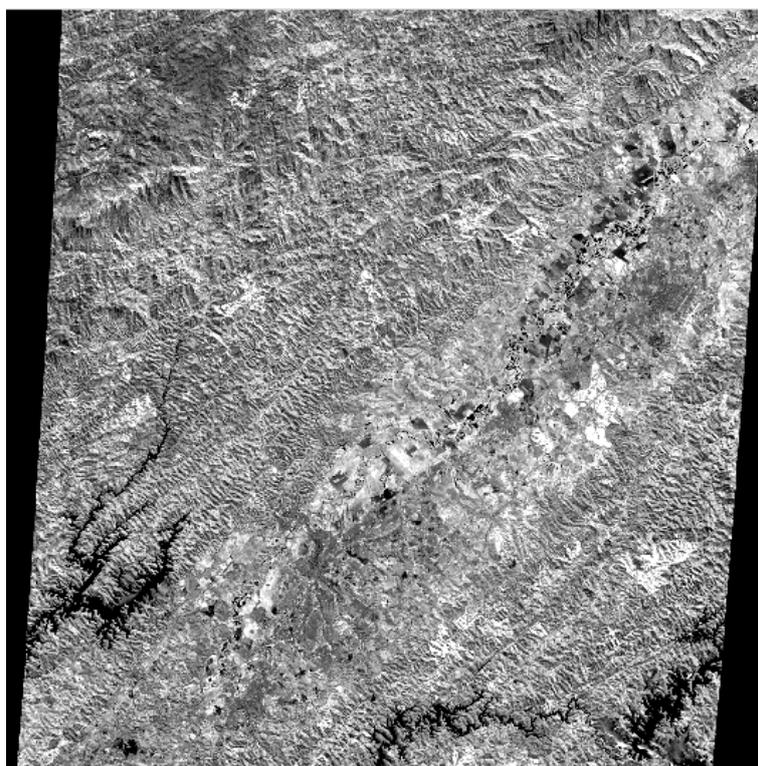


Figura 4.4 – Imagem epipolar direita gerada da banda 3B do sistema sensor ASTER.

4.2.1.2 Interpretação visual e restituição de unidades geomorfológicas homogêneas

Inicialmente, realizou-se um inventário das principais fontes bibliográficas sobre a geomorfologia da área de estudo. Com relação às bases cartográficas, foram consultados dois mapas geomorfológicos de escala regional (IPT, 1981b; ROSS E MOROZ, 1997), um mapa geomorfológico de escala de semi-detelhe (1:250.000) (FLORENZANO; CSORDAS, 1993), dois mapas geológicos também de escala regional (DNPM, 1983; IPT, 1981a) e um mapa topográfico da região (escala 1:50.000) (IBGE, 1973). Também foi consultado o trabalho detalhado de Verdade e Hungria (1966), sobre os terraços fluviais da bacia do rio Paraíba do Sul, e o trabalho de Coltrinari (2003) sobre a geomorfogênese do planalto de São José dos Campos (SP).

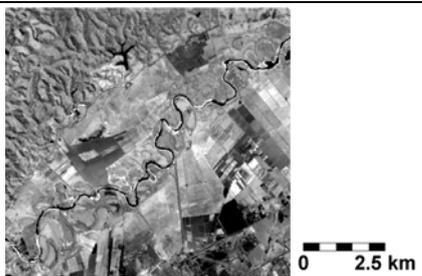
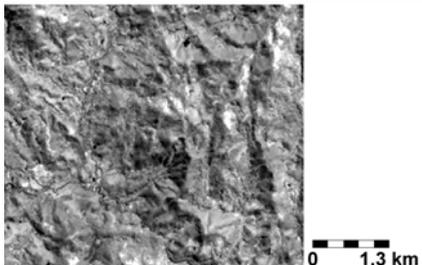
Com base nessas fontes e nas imagens do subsistema VNIR do sensor ASTER, realizou-se um trabalho de campo, no dia 11/04/07, para o reconhecimento da compartimentação geomorfológica da área de estudo e verificação dos níveis de terraços fluviais identificados por Verdade e Hungria (1966). Os dados coletados nesse trabalho

auxiliaram nas atividades seguintes, de definição da legenda, interpretação visual e restituição.

A legenda segue a proposta do sistema ITC (VERSTAPPEN E ZUIDAM, 1991) e destaca os aspectos morfogenéticos, por meio de denominações específicas, que intuitivamente indicam processos, e por cores. As formas foram separadas por grupos de processos morfogenéticos dominantes: (i) formas estruturais-denudacionais (matizes de roxo); (ii) formas de denudação (matizes de marrom) e (iii) formas de agradação (matizes de verde). Foram acrescentadas à legenda informações sobre a litologia, extraídas da carta geotécnica digital (mencionada na Seção 4.1). A nomenclatura das classes de unidades geomorfológicas foi definida com base na literatura consultada.

Antes da restituição, foram elaboradas chaves de interpretação visual (Quadros 4.4, 4.5 e 4.6) que auxiliaram na identificação das feições geomorfológicas. Os processos e as principais estruturas litológicas, relacionadas à gênese dessas feições, são especificados no Capítulo 3.

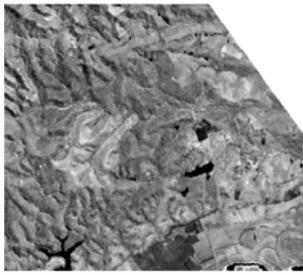
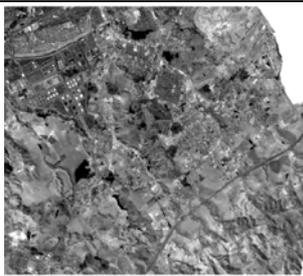
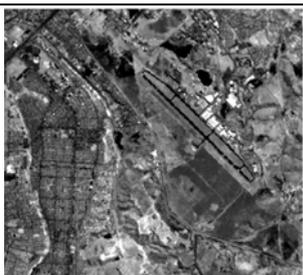
Os critérios para delimitação das unidades foram as rupturas nos talwegues (quebras negativas) e nos interflúvios (quebras positivas). Cabe salientar que a utilização de imagens com geometria epipolar (Figuras 4.3 e 4.4) possibilitou aos vetores qualidade geométrica semelhante à do MDE (ver detalhes na Seção 4.2.2.1).

Formas de agradação		
	Planície aluvial tipo 1	Baixa amplitude altimétrica; baixa rugosidade; adjacente a canal fluvial meandrante.
	Planície aluvial tipo 2	Baixa amplitude altimétrica; baixa rugosidade; áreas pequenas; localizada no interior de sistemas montanhosos ou serranos.

Quadro 4.4 - Conclusão

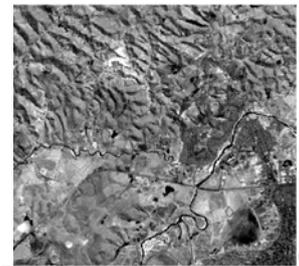
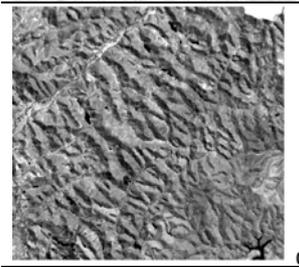
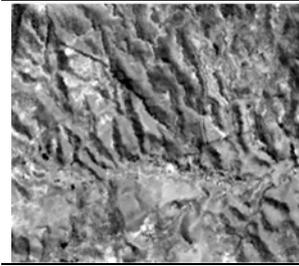
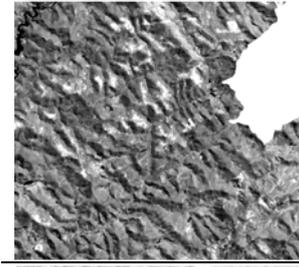
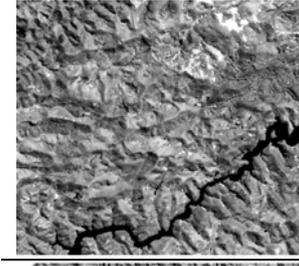
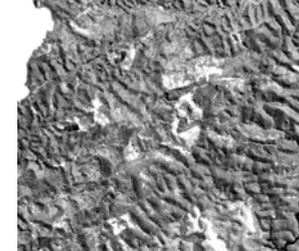
Formas de agradação		
	<p>Terraços fluviais</p>	<p>Superfícies planas adjacentes à planície aluvial do tipo 1, com desnível topográfico em relação a essas em torno de 15 a 40 metros.</p>

Quadro 4.4 – Chaves de interpretação das formas de agradação.

Formas de denudação		
	<p>Colinas sedimentares tipo 1</p>	<p>Média amplitude altimétrica; interflúvios pequenos e alongados, adjacentes à planície aluvial do tipo 1.</p>
	<p>Colinas sedimentares tipo 2</p>	<p>Média amplitude altimétrica; adjacentes à planície aluvial do tipo 1 e a colinas sedimentares do tipo 2; interflúvios subangulosos e grandes.</p>
	<p>Colinas sedimentares tipo 3</p>	<p>Média amplitude altimétrica; adjacentes aos terraços fluviais, à planície aluvial do tipo 1 e a colinas sedimentares do tipo 2; interflúvios tabulares (topos planos) e grandes.</p>

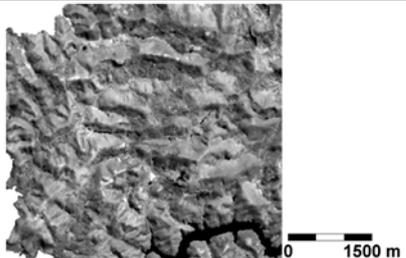
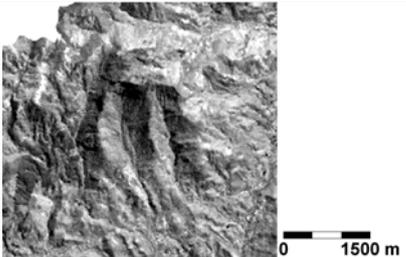
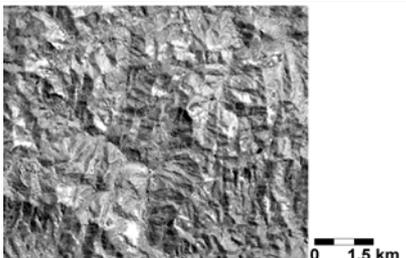
Quadro 4.5 – Chaves de interpretação das formas de denudação.

Formas estruturais-denudacionais

	<p align="center">Morros tipo 1</p>	<p>Média-alta amplitude altimétrica; interflúvios subangulosos e curtos; média rugosidade.</p>
	<p align="center">Morros tipo 2</p>	<p>Média-alta amplitude altimétrica; interflúvios angulosos, curtos, alongados e paralelos; alta rugosidade.</p>
	<p align="center">Morrotes</p>	<p>Média amplitude altimétrica; interflúvios angulosos e curtos; alta rugosidade; localizados no interior de sistemas serranos.</p>
	<p align="center">Montanhas tipo 1</p>	<p>Alta amplitude altimétrica; interflúvios angulosos e longos; canais de drenagem retilíneos e subparalelos; alta rugosidade.</p>
	<p align="center">Montanhas tipo 2</p>	<p>Alta amplitude altimétrica; interflúvios subangulosos e curtos; drenagem dendrítica; média rugosidade.</p>
	<p align="center">Montanhas tipo 3</p>	<p>Alta amplitude altimétrica; interflúvios angulosos e curtos; drenagem dendrítica; alta rugosidade.</p>

(Continua)

Quadro 4.6 - Conclusão

Formas estruturais-denudacionais		
	Montanhas tipo 4	Alta amplitude altimétrica; interflúvios subangulosos e longos; drenagem dendrítica; média-alta rugosidade.
	Serra escarpada tipo 1	Muito alta amplitude altimétrica; interflúvios angulosos e escarpados; canais retilíneos e paralelos; alta rugosidade.
	Serra escarpada tipo 2	Muito alta amplitude altimétrica; interflúvios angulosos e escarpados; canais retilíneos e subparalelos; alta rugosidade.

Quadro 4.6 – Chaves de interpretação das formas estruturais-denudacionais.

4.2.2 Extração de MDE de par estereoscópico de imagens ASTER/Terra

Para a extração do MDE, empregou-se o modelo ajustado e as imagens epipolares, mencionados na Seção 4.2.1.1. O cálculo das paralaxes foi efetuado por meio de janelas de busca e correlação. A amostragem foi realizada a cada dois *pixels* (fator de amostragem de 30 m), e a medida de correlação utilizada foi o coeficiente normalizado de correlação cruzada.

O cálculo das paralaxes é descrito na Seção 2.4.1. A grade final foi gerada com 15 m de resolução espacial e referenciada ao *datum* horizontal SAD69/Brasil, projeção UTM. Os valores da grade correspondem a altitudes ortométricas obtidas de pontos de controle, também apresentados na Seção 4.2.1.1.

4.2.2.1 Validação do MDE

4.2.2.1.1 Análise da exatidão

Na análise da exatidão (detalhada na Seção 2.5.1), foram utilizados como referência os critérios estabelecidos pelas Normas Técnicas da Cartografia Nacional: (i) classes de exatidão por escala, (ii) Erro Padrão (EP) e (iii) Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). O EP consiste no desvio padrão de referência. O PEC, o qual define a exatidão de produtos cartográficos, corresponde a um indicador estatístico de dispersão a 90% de probabilidade obtido a partir do EP (BRASIL, 1984). Os critérios para análise da exatidão são sumarizados nas Tabelas 4.2 e 4.3. Na Tabela 4.2, para se obter EP e PEC em metros, deve-se multiplicar os valores (em mm) pelo denominador da escala da carta.

Os dados de referência (base cartográfica e pontos GPS) devem apresentar erro inferior a um terço do erro padrão estabelecido para uma determinada classe de qualidade do produto a ser avaliado (MERCHANT, 1982). Nesse contexto, cabe destacar que as coordenadas GPS têm precisão centimétrica, e a base de eixo de logradouros, descrita na Seção 4.1, apresenta erro inferior a um terço do erro padrão para o PEC classe A, escala 1:50.000 (<5m). Sendo assim, essa base é adequada para a validação do MDE ASTER.

Tabela 4.2 – Padrão de exatidão planimétrico e erro padrão para as classes A, B e C.

CLASSE	PEC (mm)	EP (mm)
A	0,5	0,3
B	0,8	0,5
C	1,0	0,6

Fonte: Brasil (1984)

Tabela 4.3 – Padrão de exatidão altimétrico e erro padrão para as classes A, B e C (em fração de equidistância das curvas de nível).

CLASSE	PEC	EP
A	1/2	1/3
B	3/5	2/5
C	3/4	1/2

Fonte: Brasil (1984)

Para a análise da componente vertical (H), foram empregados como referência os 109 pontos GPS mencionados na Seção 4.1. Por outro lado, para a análise das componentes E, N e da resultante planimétrica, utilizaram-se 28 pontos (distintos dos GCPs) coletados na base de eixo de logradouros, também mencionada na Seção 4.1. Como não é possível identificar as feições notáveis (cruzamentos de vias) dessa base no MDE, a validação da planimetria foi feita de forma indireta a partir da identificação dessas feições nas orto-imagens do sistema sensor VNIR. Cabe salientar que na geração das orto-imagens foi utilizado o mesmo modelo matemático e MDE, mencionados na Seção 4.2.2. É importante lembrar, novamente, que os produtos e as referências para validação estavam ambos referenciados ao *datum* horizontal SAD69/Brasil, projeção UTM.

De acordo com Merchant (1982), a amostra de validação deve ser constituída de, no mínimo, 20 pontos bem distribuídos. A Figura 4.5 apresenta a distribuição dos pontos de validação da altimetria e da planimetria. Um fator limitante na avaliação da altimetria foi a distribuição dos pontos, a qual não cobriu todo o território do município. Na Figura 4.6, é apresentada uma ilustração (sem escala) do procedimento de coleta de pontos para a validação da planimetria.

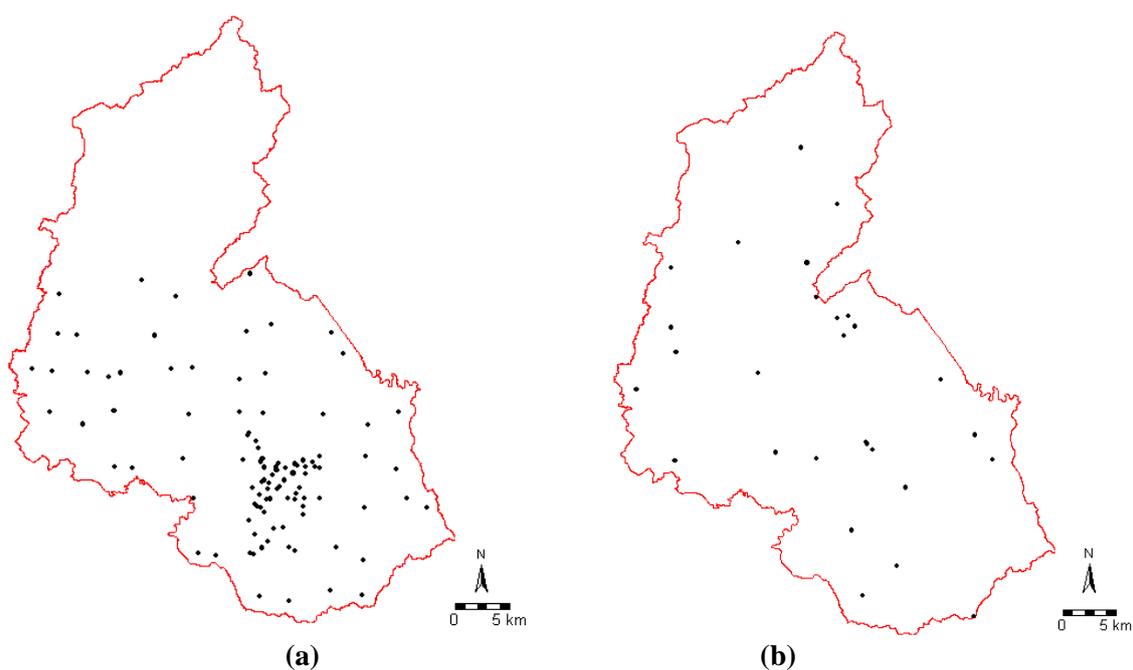


Figura 4.5 – Distribuição dos pontos de validação da altimetria (a) e da planimetria (b).

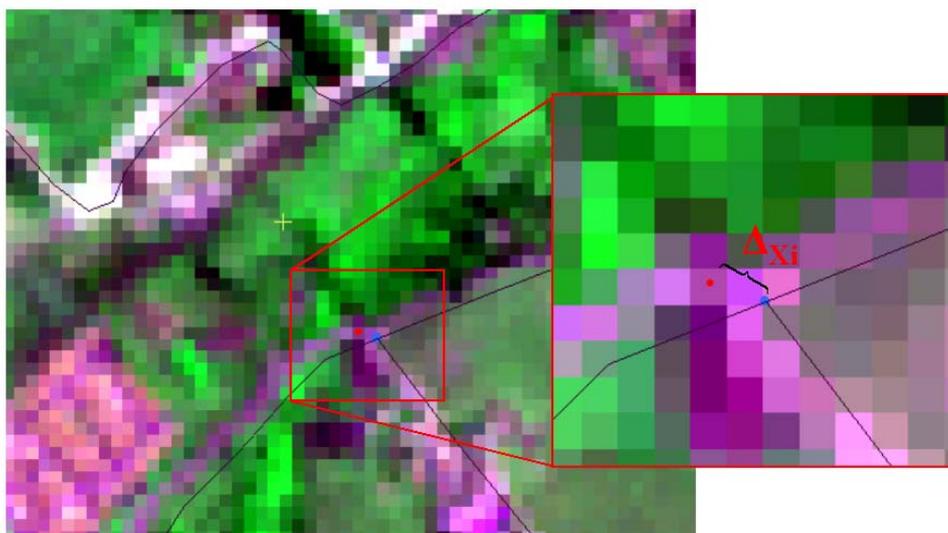


Figura 4.6 – Exemplo de coleta de pontos para a validação planimétrica: (i) resíduo planimétrico (Δ_{xi}), (ii) feição de referência (ponto azul, no entroncamento das vias) e (iii) feição para validação (ponto vermelho).

4.2.2.1.2 Acurácia vertical relativa

Na avaliação da acurácia vertical relativa, foi desenvolvido um algoritmo, na plataforma MatLab 7, para o cálculo das diferenças entre os pares de pontos únicos. A partir dos 109 pontos, descritos na Seção 4.1, foram obtidos 5.886 pares únicos. As diferenças altimétricas, em módulo, entre os pontos de cada par foram calculadas para os dados de referência (altitudes ortométricas obtidas do GPS) e para os dados altimétricos do MDE ASTER. Posteriormente, foram obtidos os módulos das diferenças entre esses valores (Equação (2.20) e Figura 2.4, Seção 2.5.2). Os resultados foram submetidos a uma análise estatística descritiva para extração dos valores mínimo, máximo, média, desvio padrão e mediana.

4.2.3 Classificação semi-automatizada de unidades geomorfológicas com base em modelos cognitivos

4.2.3.1 Variáveis iniciais

Os modelos cognitivos se baseiam em redes semânticas hierárquicas (detalhadas na Seção 2.2.1). Essas redes empregam conceitos de AOO e, desse modo, têm como elemento fundamental o objeto.

No sistema de interpretação de imagens utilizado nesta pesquisa (BENZ et al., 2004), os objetos das redes semânticas hierárquicas são obtidos da segmentação de imagens. Para a geração de objetos e atributos (estes, a partir dos objetos obtidos da segmentação), selecionou-se um conjunto de variáveis (imagens e dados matriciais), constituído por dados multiespectrais, morfométricos e texturais, principalmente. Além desses dados, utilizaram-se uma imagem temática da rede de drenagem (obtida dos arquivos vetoriais mencionados na Seção 4.1), uma grade (imagem) de fluxo acumulado extraída do MDE ASTER e uma imagem de relevo sombreado também gerada do MDE ASTER. A grade de fluxo acumulado é um dos subprodutos do processo de extração automática de redes de drenagens.

Os dados multiespectrais são as bandas (ortorretificadas) 1, 2 e 3N do subsistema VNIR. Os dados morfométricos são compostos do MDE ASTER (ver Seção 4.2.2) e das VGs extraídas desse (ver Seção 2.6). Com relação aos dados texturais, foram extraídas do MDE as variáveis mencionadas na Seção 2.7. Posteriormente, por meio de uma análise visual (decisão arbitrária apoiada em conhecimento geomorfológico da área), selecionaram-se as seguintes variáveis: (i) segundo momento angular, (ii) entropia e (iii) desvio padrão. O Quadro 4.7 apresenta as variáveis iniciais dos modelos cognitivos.

Tipo de variável	Descrição
Multiespectral	Imagem ortorretificada da Banda 1 Imagem ortorretificada da Banda 2 Imagem ortorretificada da Banda 3N
Geomorfométrica	Altimetria (MDE ASTER) Declividade Orientação de vertentes Curvatura vertical Curvatura horizontal
Textural	Segundo momento angular Entropia Desvio padrão
Outras	Imagem temática da rede de drenagem Grade de fluxo acumulado Relevo sombreado

Quadro 4.7 – Resumo das variáveis iniciais dos modelos cognitivos.

4.2.3.2 Classificação das macro-unidades geomorfológicas

4.2.3.2.1 Estratégia de segmentação

Algoritmos de segmentação também têm sido aplicados em MDEs com o intuito de compartimentação e classificação de unidades geomorfológicas. Verifica-se o emprego de algoritmos que se baseiam nos métodos de crescimento de regiões (MILIARESIS, 2001; MILIARESIS; ARGIALAS, 1999; 2002) e multi-resolução com crescimento de regiões (BURNETT; BLASCHKE, 2003; DRAGUT; BLASCHKE, 2006; ASSELEN; SEIJMONSBERGEN, 2006). Nesta pesquisa, utilizou-se o último método.

Esse algoritmo realiza vários níveis de segmentação. Cada nível respeita as bordas ou limites dos objetos dos demais níveis. Por exemplo, se temos um nível com objetos grandes, ao segmentarmos um novo nível (inferior), os objetos desse novo nível serão subdivisões dos objetos do nível maior e respeitarão as bordas desses. Assim, para a obtenção de objetos que atendam a uma demanda específica, deve-se realizar um planejamento criterioso sobre o número de níveis, variáveis utilizadas e a seqüência de segmentação.

Neste trabalho, a estratégia multi-nível foi realizada passo a passo, a partir das macro-unidades geomorfológicas (nível grosseiro) até as 15 unidades geomorfológicas

detalhadas (nível fino), as quais foram estabelecidas na legenda do mapa obtido da interpretação visual (ver Seção 4.2.1.2). Para isso, foram realizados quatro níveis de segmentação.

Em uma primeira etapa, foram gerados três níveis. No nível 1, foram segmentados os reservatórios ou corpos d'água; no nível 2, foram segmentadas as macro-unidades geomorfológicas, e, no nível 3, foram segmentadas áreas aproximadamente homogêneas para a extração da densidade de drenagem. Essa forneceu atributos para a classificação, detalhada adiante (Seção 4.2.3.2.3). Os objetos são pequenos no nível 1 e aumentam progressivamente até o nível 3.

Devido à dependência entre os limites dos objetos, mencionada acima, as segmentações dos níveis 1 e 3 foram realizadas separadamente, em projetos distintos. Isso foi necessário porque, para o cálculo da densidade de drenagem, os canais foram segmentados em um fator de escala muito pequeno. O mesmo ocorreu na segmentação dos reservatórios. Assim, esses segmentos (canais de drenagem e reservatórios) atrapalhariam a segmentação das macro-unidades do nível 2. Desse modo, os procedimentos para extração dos reservatórios e para o cálculo da densidade de drenagem foram feitos isoladamente, e os resultados foram incorporados à primeira etapa com três níveis, de modo que não comprometeram a segmentação das macro-unidades geomorfológicas (nível 2). Na Tabela 4.4 são apresentadas as variáveis e parâmetros empregados nessa primeira etapa de segmentação.

Tabela 4.4 – Variáveis e parâmetros utilizados na segmentação das macro-unidades geomorfológicas (e = fator de escala; c = cor; f = forma; comp. = compacidade e suav. = suavidade).

Etapa/Nível	Variável segmentada	e	c	f	comp.	suav.
Extração dos reservatórios	Banda 3N (número digital)	30	0,8	0,2	0,5	0,5
Extração das macro-unidades	Altimetria (MDE)	50	0,7	0,3	0,3	0,7
Cálculo da densidade de drenagem	Imagem temática da hidrografia	25	0,9	0,1	0,5	0,5
	Relevo sombreado	200	0,1	0,9	0,5	0,5

Na segmentação das macro-unidades (nível 2), foram utilizados o MDE e os parâmetros apontados pelo trabalho de Asselen e Seijmonsbergen (2006). Com relação aos reservatórios (nível 1), foram testados parâmetros e variáveis multiespectrais que os

delimitassem adequadamente. Para a densidade de drenagem (nível 3), utilizou-se o relevo sombreado, e pesos maiores para a forma e compacidade, na extração de unidades homogêneas. Também foi utilizada uma imagem temática da rede de drenagem, da qual foram extraídas as áreas dos canais. Assim, para cada unidade homogênea (obtida da segmentação do relevo sombreado), foi calculada a razão entre a área dos canais e a área da unidade (densidade de drenagem).

Mais detalhes sobre o cálculo da densidade de drenagem são apontados na Seção 4.2.3.2.3. Cabe salientar que edições manuais foram realizadas para a correção de erros na delimitação das unidades (ver Seção 5.3.1) e nas classificações dos níveis 1 e 3 (ver Seção 5.3.2).

4.2.3.2.2 Conversão das chaves de interpretação em atributos

Utilizou-se a legenda do mapa obtido da interpretação visual, a qual foi adaptada para a apresentação das macro-unidades geomorfológicas. Porém, as chaves de interpretação (ver Seção 4.2.1.2) foram convertidas em atributos (calculados a partir dos objetos da segmentação), pois, as análises foram realizadas sobre as variáveis mencionadas no Quadro 4.7 (Seção 4.2.3.1) e não mais sobre as imagens estereoscópicas do infravermelho próximo. Essas chaves de interpretação representam o conhecimento do analista/geomorfólogo que será armazenado e emulado nas redes semânticas hierárquicas, detalhadas adiante (Seção 4.2.3.2.3).

A seleção de atributos foi efetuada por meio de uma análise exploratória visual e da análise de histogramas com valores de atributos (por amostras de objetos), para as distintas classes de interesse. Na Figura 4.7 é apresentado um exemplo desse processo. Por outro lado, os atributos para a classificação semi-automatizada das macro-unidades geomorfológicas são apresentadas na Tabela 4.5.

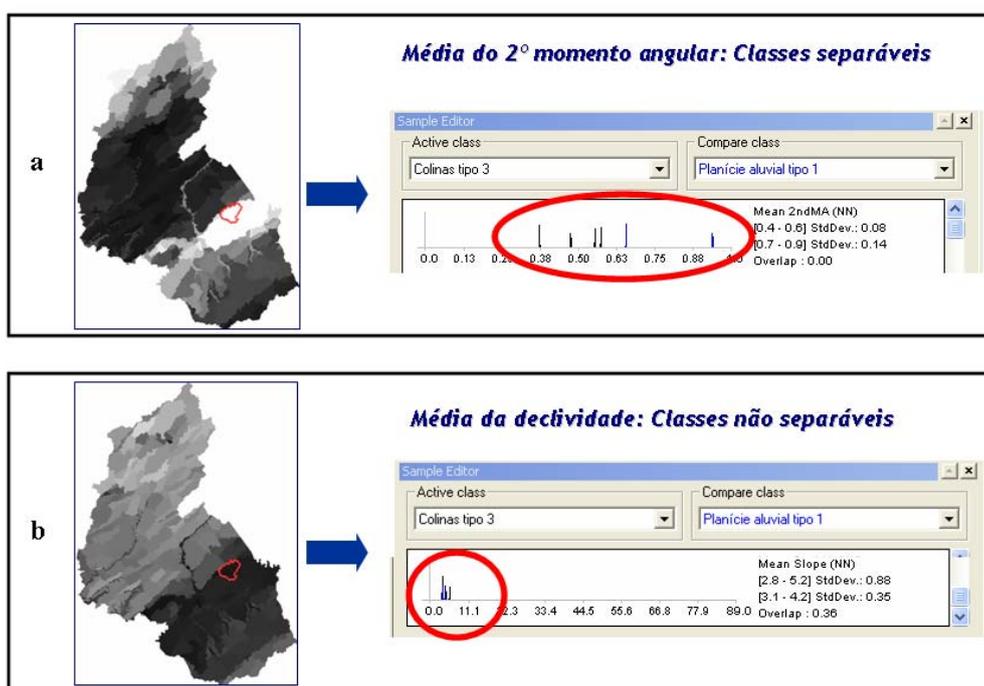


Figura 4.7 – Exemplo de procedimento para análise exploratória de atributos: em **a**, atributo média do segundo momento angular para cada objeto da segmentação das macro-unidades geomorfológicas e seu respectivo histograma, com boa separabilidade entre as classes Colinas tipo 3 e Planície Aluvial Tipo 1; em **b**, atributo média da declividade para cada objeto da segmentação das macro-unidades geomorfológicas e seu respectivo histograma, com má separabilidade entre as classes Colinas tipo 3 e Planície Aluvial Tipo 1.

Tabela 4.5 – Atributos das macro-unidades geomorfológicas e reservatórios.

Macro-unidades	Atributos
Serras/Montanhas/Morros	alta densidade de drenagem (nível 3); média da altimetria entre 572 – 2100m; média da declividade entre 4,9° – 34,9°.
Colinas sedimentares	média da altimetria entre 560 – 688m; média da entropia entre 1,2 – 2,2; média da declividade entre 2,5° – 12°.
Planícies fluviais	média da entropia entre -0,01 – 1,5; média da declividade entre 1,4° – 10°.
Alvéolos/Planícies intermontanas	amplitude altimétrica entre 10 - 12m; média da altimetria entre 678 – 687m; média da declividade entre 2,88° – 4,75°.
Reservatórios	existência de corpos d'água no nível 1.

Os atributos empregam o operador lógico AND, pois, para a definição de uma classe, várias condições devem ser atendidas simultaneamente. Cabe salientar que o sistema de

classificação utilizado nesta pesquisa emprega o operador *fuzzy* AND (detalhes na Seção 2.2.2).

A maioria dos atributos (valores de médias e amplitude altimétrica), apresentados na Tabela 4.5, foram calculados a partir dos objetos obtidos da segmentação. Outro aspecto verificado é a confusão entre classes, para alguns atributos. Essa redundância foi minimizada através: (i) da utilização do operador *fuzzy* AND, e suas funções ou curvas flexíveis; e (ii) a partir do conceito de herança oriundo da AOO (detalhes na Seção 4.2.3.2.3).

Nas Tabelas 4.6 e 4.7 são apresentados, respectivamente, os atributos empregados nas classificações dos corpos d'água e da densidade de drenagem. Por outro lado, na Tabela 4.8, são apresentados os atributos das subclasses de erros de comissão, os quais foram utilizados no refinamento da densidade de drenagem. As características dessas subclasses serão detalhadas na próxima Seção.

Tabela 4.6 – Atributos da classe corpos d'água.

Classe	Atributos
Corpos d'água	média da altimetria entre 609 – 707m; média do número digital da banda 3N entre 14 – 46.

Tabela 4.7 – Atributos empregados na classificação da densidade de drenagem.

Nível de segmentação	Classe	Atributos
Hidrografia	Canais fluviais	média do número digital da imagem temática da drenagem (255).
	Não-canais	média do número digital da imagem temática da drenagem diferente de 255.
Densidade de drenagem	Alta densidade de drenagem	área relativa dos canais por célula de densidade de drenagem (0,044 a 1).
	Baixa-média densidade de drenagem	área relativa dos canais por célula de densidade de drenagem (-0,0001 a 0,0435).

Tabela 4.8 – Atributos empregados no refinamento da densidade de drenagem, a partir de subclasses de erros de comissão.

Classe	Subclasse	Atributos
Baixa-média densidade de drenagem	Baixa-média (real)	borda relativa à classe Alta densidade de drenagem (0,15 – 0,9)
	Erros de comissão: Alta densidade de drenagem	borda relativa à classe Alta densidade de drenagem (0,15 – 0,9).

4.2.3.2.3 Definição da rede semântica hierárquica e classificação

Nesta pesquisa, as redes semânticas hierárquicas destinam-se ao armazenamento e replicação do conhecimento obtido das chaves de interpretação e dos atributos (mencionados na Seção anterior). Por meio dessas redes, explorou-se o conceito de hereditariedade para minimizar a redundância de atributos entre classes. Um aspecto importante da hereditariedade, explorado na classificação das macro-unidades geomorfológicas, foi a possibilidade da criação de subclasses que representem erros da classificação. Assim, os erros de comissão podem ser identificados durante o processo de classificação e direcionados para as classes corretas.

A rede semântica utilizada na classificação das macro-unidades geomorfológicas é apresentada na Figura 4.8. Observa-se o modo como os níveis de segmentação e suas diferentes classes se relacionam para a classificação das unidades do nível 2. Assim, a classe “Serras/Montanhas/Morros” utiliza como atributo a existência da classe “Alta Densidade de Drenagem” (no nível 3) (arco do tipo *é-um*), “Reservatórios” utiliza como atributo a existência da classe “Corpos d’água” (no nível 1) (arco do tipo *é-um*), e as classes “Colinas Sedimentares” e “Planícies fluviais” são subdivididas (arco do tipo *é-parte*) em acertos (nome da classe acrescido da palavra “real” entre parênteses) e erros de comissão.

Os atributos utilizados foram os estabelecidos na Seção 4.2.3.2.2. Esses atributos estabeleceram os limites das funções *fuzzy* AND. Cabe salientar que as subdivisões, referentes aos erros de comissão, utilizaram novos atributos. Assim, para os erros de comissão referentes à classe “Serras/Montanhas/Morros”, foram empregados valores de borda relativa aos objetos dessa classe. Por outro lado, para os erros de comissão

referentes à classe “Colinas Sedimentares”, foi empregada a diferença média da variável fluxo acumulado entre os objetos da classe “Colinas Sedimentares”. A relação completa das funções *fuzzy* é apresentada no Anexo F, e detalhes sobre as classificações dos níveis 1 (Reservatórios) e 3 (Densidade de Drenagem) são apontados na Seção 5.3.2.

Na Tabela 4.9, há um resumo dos atributos das subclasses de erros de comissão. Cabe destacar que, nesta pesquisa, um esboço da rede semântica hierárquica foi definido antes do início da segmentação. Porém, sua definição foi possível somente após a análise dos atributos e, também, da verificação da quantidade de subclasses de erros necessárias.

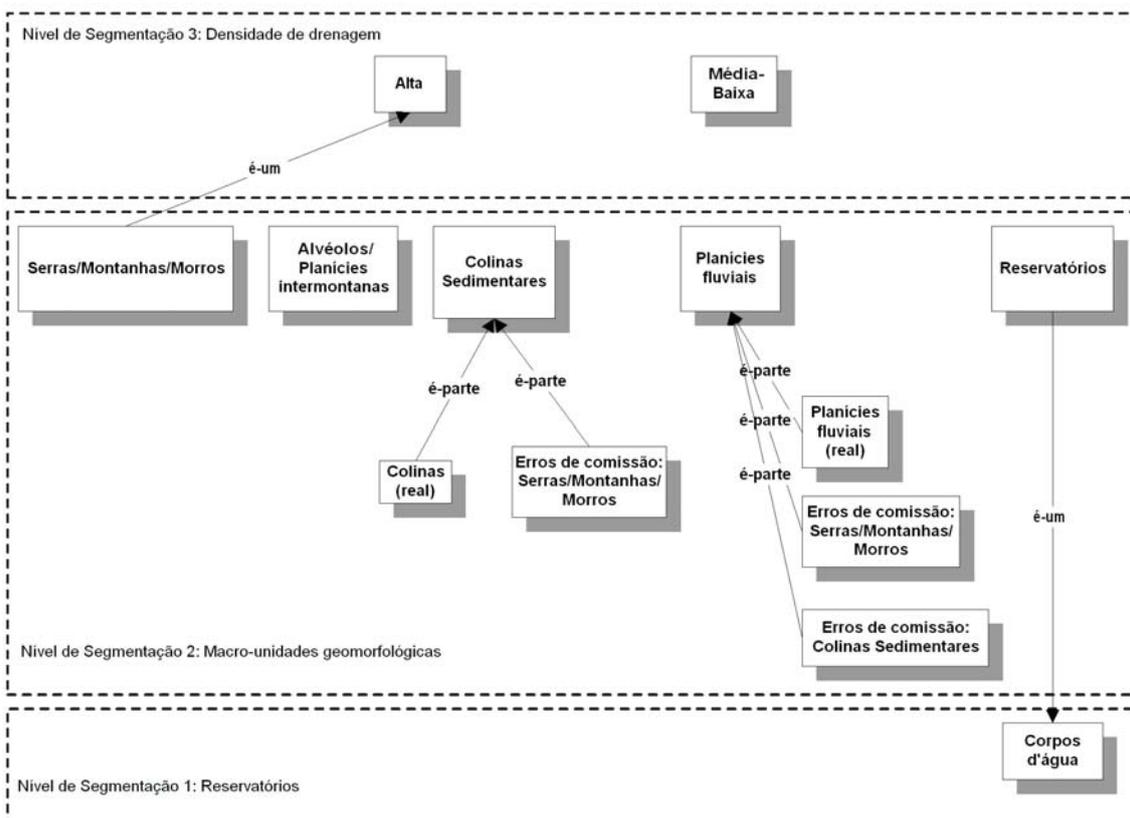


Figura 4.8 – Rede semântica hierárquica utilizada na classificação das macro-unidades geomorfológicas.

Tabela 4.9 – Atributos empregados no refinamento das macro-unidades geomorfológicas, a partir de subclasses de erros de comissão.

Macro-unidades	Subclasses	Atributos
Colinas sedimentares	Colinas Sedimentares (real)	borda relativa à classe Serras/Montanhas/Morros (0 – 1).
	Erros de comissão: Serras/Montanhas/Morros	borda relativa à classe Serras/Montanhas/Morros (0 – 1).
Planícies fluviais	Planícies fluviais (real)	diferença média do fluxo acumulado entre a classe colinas (-850 a 2050); borda relativa à classe Serras/Montanhas/Morros (0 – 0,5).
	Erros de comissão: Serras/Montanhas/Morros	borda relativa à classe Serras/Montanhas/Morros (0,4 – 0,64);
	Erros de comissão: Colinas Sedimentares	diferença média do fluxo acumulado entre a classe colinas (-850 a 2050); variância da curvatura horizontal (16,35 – 17).

4.2.3.2.4 Pós-processamentos

As tarefas de pós-processamentos utilizaram um conjunto de algoritmos disponível na plataforma de interpretação de imagens, empregada nesta pesquisa (DEFINIENS, 2006). Esses algoritmos têm interface gráfica para usuário (GUI – *Graphic User Interface*) e podem ser parametrizados.

Desse modo, foram empregados dois tipos de algoritmos: (i) *find enclosed by class* e (ii) *find local extrema*. O primeiro (i) classifica (ou re-classifica) os objetos de acordo com regras de vizinhança. Por exemplo, classificar todos os objetos não-classificados contidos por objetos da classe “Colinas Sedimentares”, como “Colinas Sedimentares”. Assim, todos os objetos que satisfaçam essa regra são classificados. O segundo (ii) também classifica (ou re-classifica) objetos de acordo com valores extremos de um dado atributo, verificados nas vizinhanças dos objetos. Por exemplo, um objeto não-classificado não está totalmente contido por objetos de uma dada classe e, desse modo, não pode ser classificado pelo primeiro algoritmo (i). Neste caso, podemos utilizar uma busca de todos os objetos não-classificados com valores extremos (máximo, por exemplo) de vizinhança com uma dada classe (“Colinas Sedimentares”, por exemplo). Os objetos que atenderem essa regra serão classificados como “Colinas Sedimentares”.

Dessa forma, após o esgotamento das possibilidades de classificação das redes semânticas, foi construída uma rotina composta de algoritmos concatenados para o refinamento da classificação. Esse processo é apresentado nas Seções 5.3.2 e 5.4.2.

4.2.3.3 Classificação das unidades geomorfológicas detalhadas

4.2.3.3.1 Estratégia de segmentação

Nessa segunda etapa de segmentação, para a subdivisão e detalhamento das macro-unidades geomorfológicas, foi obtido o nível final do processo de classificação. Para isso, foram empregados recursos avançados de segmentação baseada em classificação para a fusão dos objetos do nível 3 (macro-unidades geomorfológicas).

Assim, os objetos de cada macro-unidade geomorfológica foram agrupados em um só objeto (compreendendo uma macro-unidade) e, posteriormente, houve a segmentação das unidades finais, no interior desses objetos. Essa segmentação foi realizada em um novo nível a partir da imagem de relevo sombreado. Como o procedimento de agrupamento de objetos (da segmentação baseada em classificação) realiza a fusão de objetos de níveis superiores, foi necessária a reorganização dos níveis para a preservação das bordas do nível com as unidades de densidade de drenagem. Desse modo, as unidades geomorfológicas detalhadas foram segmentadas no nível 1; a densidade de drenagem ocupou o nível 2; os reservatórios ocuparam o nível 3; e, por fim, as macro-unidades geomorfológicas foram re-segmentadas no nível 4.

Com relação às variáveis, testes com a declividade e as curvaturas (horizontal e vertical) foram realizados. A variável declividade apresentou bons resultados visuais, o que era, de alguma forma, esperado, uma vez que a declividade destaca os principais critérios para delimitação de unidades homogêneas (interflúvios e talwegues). Porém, essa variável gerou um grande número de objetos pequenos, os quais continham quantidade reduzida de *pixels* e, desse modo, não apresentavam atributos estatísticos adequados para os procedimentos de classificação. Situação semelhante ocorreu nos testes que combinaram a declividade com a grade de fluxo acumulado (a qual destaca os

talwegues). Nesse caso, os limites foram mais precisos, porém, os objetos também possuíam tamanhos inadequados.

Hay et al. (2003) destacam que esses fatos são casos específicos do “problema da unidade de área modificável” (*Modifiable Areal Unit Problem - MAUP*), também conhecido como falácia ecológica ou *ecological fallacy* (OPENSHAW, 1984). MAUP representa a variabilidade dos atributos de uma população de acordo com a agregação espacial. De acordo com esses autores, o MAUP pode ser minimizado a partir de análises multiescalares de agregação dos elementos da paisagem (HAY et al., 2003).

Desse modo, outros testes foram realizados e foi verificado que o relevo sombreado, com peso maior para os parâmetros forma e compacidade (detalhes na Seção 2.3), foi adequado para a delimitação das unidades finais e, também, para a geração de objetos grandes. O parâmetro compacidade possibilita a segmentação de objetos maiores, mais regulares e simétricos. A Tabela 4.10 apresenta a variável e os parâmetros da segmentação das unidades geomorfológicas detalhadas.

Tabela 4.10 – Variáveis e parâmetros utilizados na segmentação das unidades geomorfológicas detalhadas (e = fator de escala; c = cor; f = forma; comp. = compacidade e suav. = suavidade).

Etapa/Nível	Variável segmentada	e	c	f	comp.	suav.
Extração das unidades geomorfológicas detalhadas	Relevo Sombreado	200	0,1	0,9	0,5	0,5

4.2.3.3.2 Conversão das chaves de interpretação em atributos

Utilizou-se a mesma legenda do mapa obtido da interpretação visual (ver Seção 4.2.1.2) e um novo conjunto de atributos foi construído. Aspectos referentes à análise exploratória de atributos, apontados na Seção 4.2.3.2.2, também são válidos na classificação das unidades geomorfológicas detalhadas. As Tabelas 4.11, 4.12 e 4.13 apresentam os atributos empregados na interpretação semi-automatizada das 15 unidades geomorfológicas detalhadas.

Tabela 4.11 – Atributos das formas de agradação (unidades geomorfológicas detalhadas).

Formas de agradação	Atributos
Planície aluvial tipo 1	inserida na macro-unidade planícies fluviais.
Planície aluvial tipo 2	inserida na macro-unidade alvéolos/planícies intermontanas.
Terraços fluviais	inseridos na macro-unidade planícies fluviais; média da altimetria entre 559,5 – 600m; exceto para média da curvatura vertical entre -0,17 - -9,999; exceto para desvio padrão do fluxo acumulado entre 4.500 – 120.000 <i>pixels</i> .

Tabela 4.12 – Atributos das formas de denudação (unidades geomorfológicas detalhadas).

Formas de denudação	Atributos
Colinas sedimentares tipo 1	inseridas na macro-unidade colinas sedimentares; variância da curvatura horizontal entre 12 – 16,5; exceto para média do segundo momento angular entre 0,3 – 0,32; exceto para média da entropia entre 1,0155 – 1,464.
Colinas sedimentares tipo 2	inseridas na macro-unidade colinas sedimentares; variância da curvatura horizontal entre 1,5 – 13,7; exceto para média da entropia entre 1,1 – 1,27.
Colinas sedimentares tipo 3	inseridas na macro-unidade colinas sedimentares; variância da curvatura horizontal entre 8 – 21; exceto para média do segundo momento angular entre 0,495 – 0,505; exceto para média da entropia entre 1,46 – 1,47.

Tabela 4.13 – Atributos das formas estruturais-denudacionais (unidades geomorfológicas detalhadas).

Formas estruturais-denudacionais	Atributos
Morros tipo 1	inseridos na macro-unidade Serras/Montanhas/Morros; média da altimetria entre 538 – 694,5m; variância da curvatura horizontal entre 8,4 – 14,15; exceto para variância da curvatura vertical entre 0,11 – 0,208.
Morros tipo 2	inseridos na macro-unidade Serras/Montanhas/Morros; média da altimetria entre 538 – 694,5m valores máximos de altimetria entre 658 – 790m;
Morrotes	amplitude altimétrica entre 139 – 172m; média da altimetria entre 736 – 831m; desvio padrão da altimetria entre 29 e 42m; desvio padrão da entropia entre 0,33 – 0,42.
Montanhas tipo 1	valores máximos de altimetria entre 755 – 1130m;
Montanhas tipo 2	variância da curvatura horizontal entre 0,1215 – 0,12175.
Montanhas tipo 3	variância da curvatura vertical entre 0,11345 – 0,11365.
Montanhas tipo 4	amplitude altimétrica entre 113 – 158m; média da declividade entre 10,5° – 13,82°; variância da curvatura horizontal entre 0,059 – 0,135.
Serra escarpada tipo 1	valores máximos de altimetria entre 1137 – 2150m; média da altimetria entre 930 – 2000m; exceto para amplitude altimétrica entre 358 – 455m; exceto para média do segundo momento angular 0,68 – 0,695; exceto para média da entropia entre 0,88 – 0,94.

Tabela 4.13 - Conclusão

Formas estruturais-denudacionais	Atributos
Serra escarpada tipo 2	valores máximos de altimetria entre 1137 – 2150m; média da altimetria entre 725 – 1300m; variância do fluxo acumulado entre $1,55939437 \cdot 10^8$ – $4,10307892 \cdot 10^8$ <i>pixels</i>

4.2.3.3.3 Definição da rede semântica hierárquica e classificação

A rede semântica hierárquica das unidades geomorfológicas detalhadas tem as mesmas características daquela mencionada na Seção 4.2.3.2.3. Há, porém, o acréscimo de classes gerais, em um nível hierárquico superior, as quais são subdivididas em subclasses inferiores detalhadas. Em consequência disso, as subclasses detalhadas herdam restrições das classes gerais (arco do tipo *é-parte*) que minimizam a confusão entre classes. A Figura 4.9 apresenta a rede semântica hierárquica utilizada na classificação das unidades geomorfológicas detalhadas.

Conforme mencionado acima, observa-se que as classes gerais “Cotas Altas” e “Cotas Médias-Altas” são utilizadas com propósito de minimizar a confusão entre suas subclasses detalhadas (arco do tipo *é-parte*). O mesmo ocorre com a classe geral “Morros” e suas subclasses detalhadas. Cabe salientar que, após a fusão de objetos (segmentação baseada em classificação), os erros de comissão das macro-unidades geomorfológicas foram incorporados às suas classes corretas. Assim, nessa rede final, o nível de segmentação 4 apresenta somente as macro-unidades geomorfológicas.

Os atributos das funções *fuzzy* foram apresentados na Seção 4.2.3.3.2. Porém, há o acréscimo dos atributos variância da curvatura vertical, diferença média da altimetria entre objetos vizinhos, além do desvio padrão do fluxo acumulado. Esses novos atributos foram inseridos nas funções *fuzzy* (Anexo G) empregadas na subdivisão da classe “Montanhas do tipo 1” (nível 1). Dessa subdivisão, foram identificados os erros de comissão e, por conseguinte, diminuída a confusão entre classes de origem estrutural-denudacional. A Tabela 4.14 apresenta uma relação das subclasses de erros de comissão e seus respectivos atributos.

Tabela 4.14 – Atributos empregados no refinamento das unidades geomorfológicas detalhadas, a partir de subclasses de erros de comissão.

Unidades geomorfológicas detalhadas	Subclasses	Atributos
Montanhas tipo 1	Erros de comissão: Morros tipo 2	variância da curvatura horizontal entre 0,195 – 0,212.
	Erros de comissão: Montanhas tipo 2 (ciclo 1)	diferença média da altimetria entre a classe Montanhas tipo 2 (-43 a 20).
	Erros de comissão: Montanhas tipo 2 (ciclo 2)	diferença média da altimetria entre a classe Montanhas tipo 2 (-90 a 59).
	Erros de comissão: Montanhas tipo 3 (ciclo 1)	diferença média da altimetria entre a classe Montanhas tipo 3 (-40 a 85).
	Erros de comissão: Montanhas tipo 3 (ciclo 2)	diferença média da altimetria entre a classe Montanhas tipo 3 (-70 a 70).
	Erros de comissão: Serra escarpada tipo 2	desvio padrão do fluxo acumulado entre 11970 a 27000 <i>pixels</i> ; exceto variância da curvatura vertical entre 0,11 – 0,21.
	Montanhas tipo 1 (real)	complementar aos atributos das classes acima; exceto desvio padrão do fluxo acumulado entre 11970 – 24640; exceto variância da curvatura vertical entre 0,195 – 0,212.

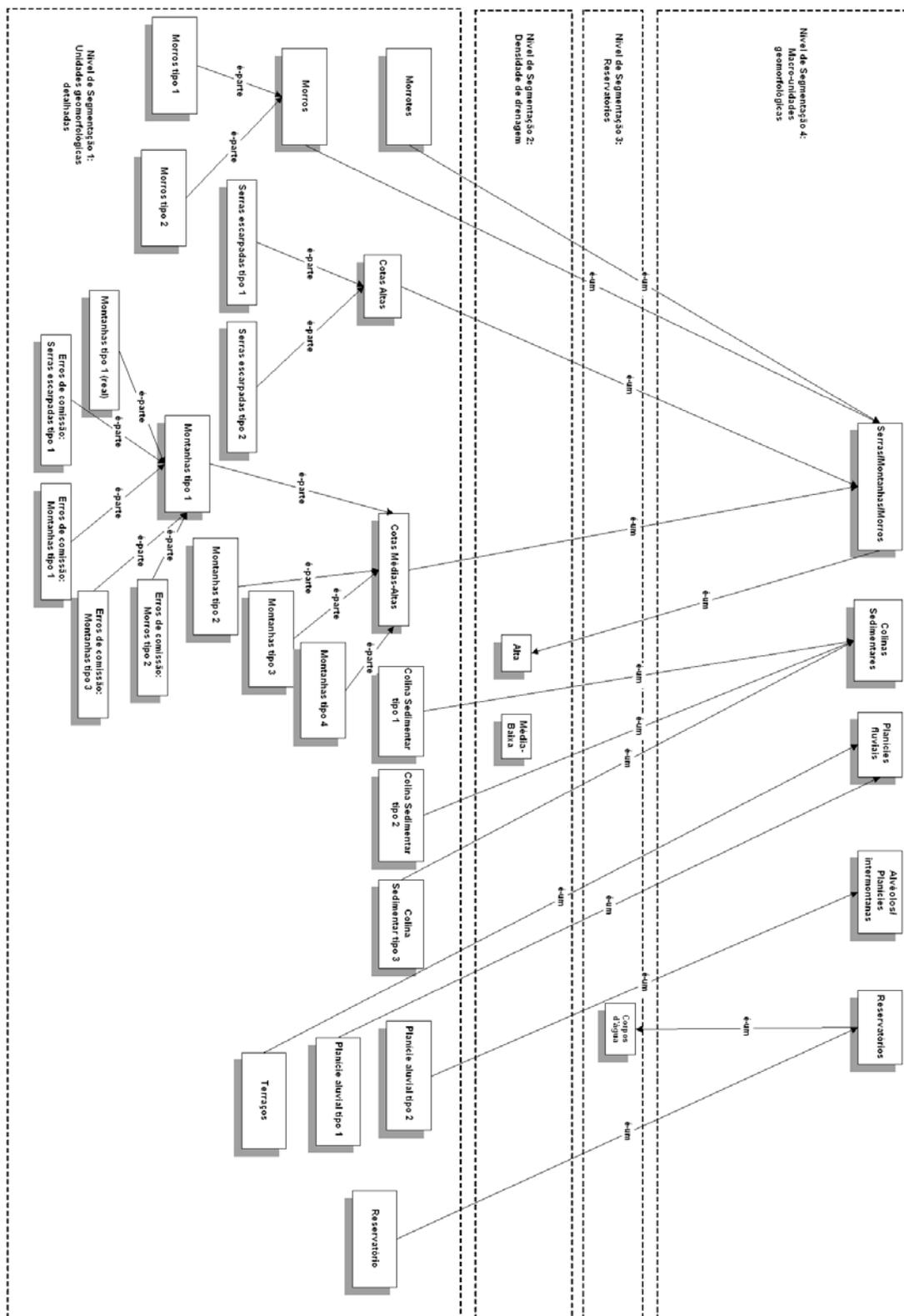


Figura 4.9 – Rede semântica hierárquica utilizada na classificação das unidades geomorfológicas detalhadas.

4.2.3.3.4 Pós-processamentos

Nos pós-processamentos das unidades geomorfológicas detalhadas, foi empregado um conjunto concatenado de algoritmos *find enclosed by class*, anteriormente descritos na Seção 4.2.3.2.4.

4.2.3.4 Sinopse das redes semânticas hierárquicas

Nesta Seção, é apresentada uma síntese do processo de classificação das unidades geomorfológicas. Assim, nas Figuras 4.10 e 4.11, destacam-se os níveis de segmentação utilizados e os relacionamentos entre as classes (e subclasses). Por outro lado, nas Tabelas 4.15 e 4.16, estão relacionados os atributos empregados nas classificações das macro-unidades e das unidades geomorfológicas detalhadas. Verifica-se que os atributos estão organizados de acordo com a variável inicial (dado de entrada dos modelos) e que as variáveis segmentadas são destacadas com um “X”, em um campo específico. Importante destacar, também, que atributos extraídos das classes (tais como, “borda relativa a”) não foram relacionados, em ambas as Tabelas.

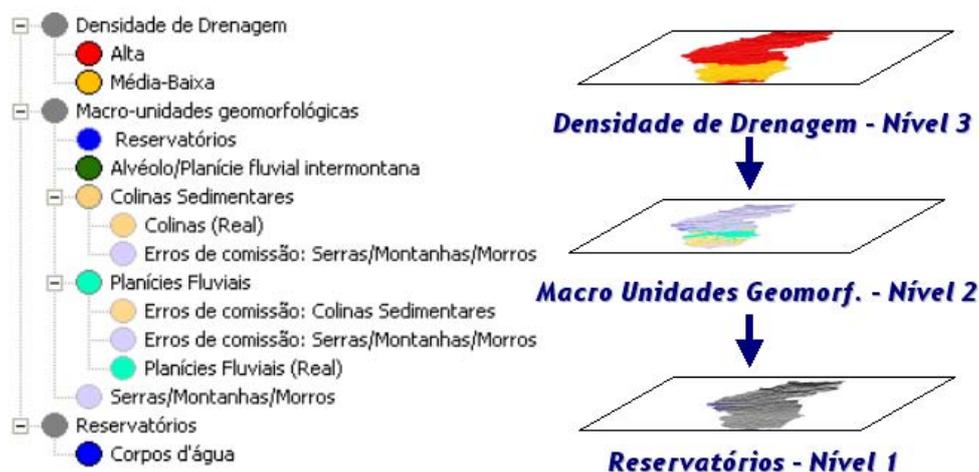


Figura 4.10 – Ilustração da rede semântica hierárquica e dos níveis de segmentação (macro-unidades geomorfológicas).

Tabela 4.15 – Resumo das principais variáveis e atributos empregados na classificação das macro-unidades geomorfológicas.

Tipo	Variáveis iniciais	Variáveis empregadas na segmentação	Atributos calculados (por objeto)
Multiespectral	Imagem ortorretificada da Banda 1		-----
	Imagem ortorretificada da Banda 2		-----
	Imagem ortorretificada da Banda 3N	X	média do número digital da banda 3N entre 14 – 46.
Geomorfométrica	Altimetria (MDE ASTER)	X	média da altimetria entre 609 – 707m; média da altimetria entre 570 – 2100m; média da altimetria entre 560 – 688m; amplitude altimétrica entre 10 - 12m; média da altimetria entre 678 – 687m.
	Declividade		média da declividade entre 5° – 35°; média da declividade entre 2,5° – 12°; média da declividade entre 1,4° – 10°; média da declividade entre 2,88° – 4,75°.
	Orientação de vertentes		-----
	Curvatura vertical		-----
	Curvatura horizontal		variância da curvatura horizontal (16,35 – 17).
Textural	Segundo momento angular		-----
	Entropia		média da entropia entre 1,2 – 2,2;
	Desvio padrão		-----
Outras	Relevo sombreado e Imagem temática da rede de drenagem	X	média do número digital da imagem temática da drenagem (255); média do número digital da imagem temática da drenagem diferente de 255; àrea relativa dos canais por célula de densidade de drenagem (0,044 a 1); àrea relativa dos canais por célula de densidade de drenagem (-0,0001 a 0,0435);
	Grade de fluxo acumulado		diferença média do fluxo acumulado entre a classe colinas (-850 a 2050); diferença média do fluxo acumulado entre a classe colinas (-850 a 2050);

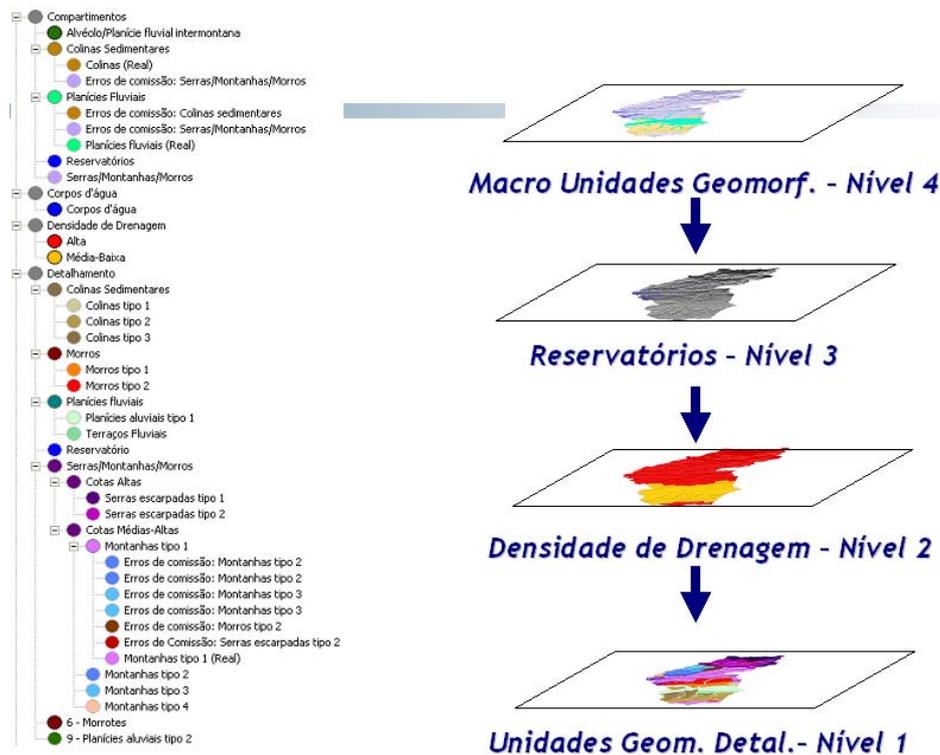


Figura 4.11 – Ilustração da rede semântica hierárquica e dos níveis de segmentação (unidades geomorfológicas detalhadas).

Tabela 4.16 – Resumo das principais variáveis e atributos empregados na classificação das unidades geomorfológicas detalhadas.

Tipo	Variáveis iniciais	Variáveis empregadas na segmentação	Atributos calculados (por objeto)
Multiespectral	Imagem ortorretificada da Banda 1		-----
	Imagem ortorretificada da Banda 2		
	Imagem ortorretificada da Banda 3N		
Geomorfométrica	Altimetria (MDE ASTER)		média da altimetria entre 560 – 600m; média da altimetria entre 538 – 694,5m; média da altimetria entre 538 – 694,5m valores máximos de altimetria entre 658 – 790m; amplitude altimétrica entre 139 – 172m; média da altimetria entre 736 – 831m; desvio padrão da altimetria entre 29 e 42m; valores máximos de altimetria entre 762 – 1130m; amplitude altimétrica entre 113 – 158m; valores máximos de altimetria entre 1137 – 2150m; média da altimetria entre 930 – 2000m; exceto para amplitude altimétrica entre 358 – 455m;

(Continua)

Tabela 4.16 - Conclusão

			valores máximos de altimetria entre 1137 – 2150m; média da altimetria entre 725 – 1300m; diferença média da altimetria entre a classe Montanhas tipo 2 (-43 a 20). diferença média da altimetria entre a classe Montanhas tipo 2 (-90 a 59). diferença média da altimetria entre a classe Montanhas tipo 3 (-40 a 85). diferença média da altimetria entre a classe Montanhas tipo 3 (-70 a 70).
	Declividade		média da declividade entre 10,5° – 13,82°;
	Orientação de vertentes		-----
	Curvatura vertical		exceto para média da curvatura vertical entre -0,17 - -10; exceto para variância da curvatura vertical entre 0,11 – 0,208. variância da curvatura vertical entre 0,11345 – 0,11365. exceto variância da curvatura vertical entre 0,11 – 0,21.
	Curvatura horizontal		variância da curvatura horizontal entre 12 – 16,5; variância da curvatura horizontal entre 1,5 – 13,7; variância da curvatura horizontal entre 8 – 21; variância da curvatura horizontal entre 8,4 – 14,15; variância da curvatura horizontal entre 0,1215 – 0,12175. variância da curvatura horizontal entre 0,059 – 0,135. variância da curvatura horizontal entre 0,195 – 0,212.
Textural	Segundo momento angular		exceto para média do segundo momento angular entre 0,3 – 0,32; exceto para média do segundo momento angular entre 0,495 – 0,505; exceto para média do segundo momento angular 0,68 – 0,695;
	Entropia		exceto para média da entropia entre 1,0155 – 1,464. exceto para média da entropia entre 1,1 – 1,27. exceto para média da entropia entre 1,46 – 1,47. desvio padrão da entropia entre 0,33 – 0,42. exceto para média da entropia entre 0,88 – 0,94.
	Desvio padrão		-----
Outras	Relevo sombreado e Imagem temática da rede de drenagem	X	-----
	Grade de fluxo acumulado		exceto para desvio padrão do fluxo acumulado entre 4.500 – 120.000 <i>pixels</i> . variância do fluxo acumulado entre 1,55939437 .10 ⁸ – 4,10307892.10 ⁸ <i>pixels</i> desvio padrão do fluxo acumulado entre 11970 a 27000 <i>pixels</i> ;

4.2.3.5 Análise das incertezas e validação das classificações

A análise das incertezas das classificações foi efetuada por meio do cálculo das diferenças entre o maior e o segundo maior valor de pertinência *fuzzy* para cada objeto, conforme destacado na Seção 2.8.2. O cálculo foi realizado anteriormente à aplicação dos algoritmos de pós-processamentos.

A validação, por objeto ou segmento, utilizou a matriz de erros e as seguintes estatísticas derivadas dessa: (i) acurácia global, (ii) acurácia do produtor, (iii) acurácia do usuário e (iv) índice Kappa. Foram validadas as classificações das macro-unidades geomorfológicas e das unidades geomorfológicas detalhadas.

No caso das unidades geomorfológicas detalhadas, foram realizadas duas validações. Em uma validação, os erros da primeira etapa de classificação (macro-unidades geomorfológicas) foram editados manualmente, e na outra, esses erros não foram editados e, portanto, se propagaram na classificação das unidades geomorfológicas detalhadas. O último procedimento (com propagação dos erros) foi proposto por Freitas (2007), conforme comunicação pessoal.

Cabe salientar que o procedimento de edição de erros é inerente a todo processo de classificação multi-nível. Porém, nesta pesquisa, realizou-se uma classificação sem edição somente para eliminar o viés e, desse modo, avaliar adequadamente a eficácia do classificador.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Validação do MDE

Anteriormente à aplicação dos métodos de validação, mencionados na Seção 4.2.2.1, realizou-se uma avaliação qualitativa do MDE para se verificar a ocorrência de áreas sem dados (problemas na extração das paralaxes). Essas áreas são mostradas pelos círculos, na Figura 5.1. Os erros mencionados ocorrem, principalmente, em áreas com corpos d'água, nas quais a correlação entre as imagens 3N e 3B foi prejudicada. Verificou-se, também, que as cenas e o MDE gerado não cobrem totalmente a área do município de São José dos Campos (SP), conforme destaca o retângulo tracejado, também na Figura 5.1.

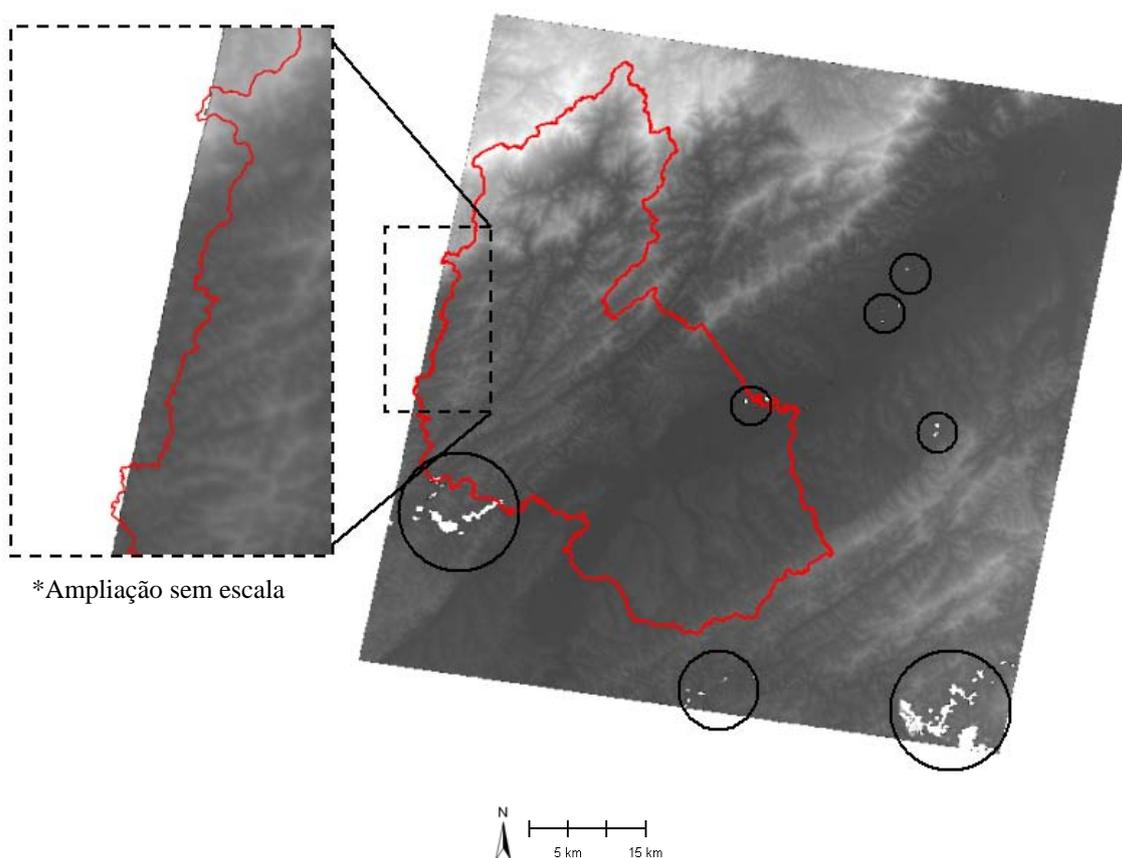


Figura 5.1 – MDE, ausência de dados (círculos) e limite de cobertura da cena ASTER (retângulo tracejado).

A avaliação qualitativa também compreendeu a verificação da ocorrência de feições espúrias, por meio da inspeção visual do MDE submetido à técnica de relevo sombreado. Tais feições foram identificadas, principalmente na planície aluvial do rio Paraíba do Sul. Possivelmente, essas foram ocasionadas pelos tipos diferentes de cobertura do solo (reflorestamento, pastagens etc.) e, também, pelas limitações na extração das paralaxes devido às áreas úmidas e corpos d'água. Testes com filtros de média e mediana (com diferentes dimensões de janelas) foram realizados, porém, sem modificações significativas. Assim, optou-se pelo uso da imagem bruta, sem filtragens. A Figura 5.2 destaca algumas dessas feições.

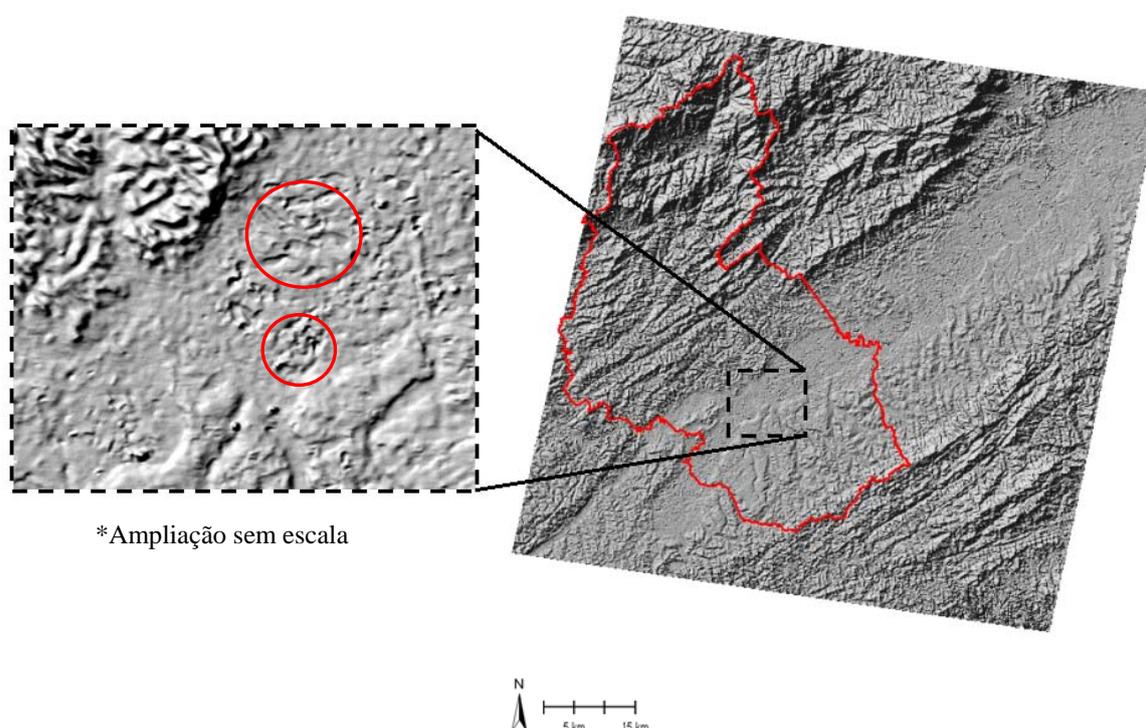


Figura 5.2 – MDE sombreado (azimute = 315°; elevação = 45°) e feições espúrias.

Posteriormente, foram computadas as estatísticas referentes ao método de análise da exatidão, mencionado na Seção 4.2.2.1.1. A Tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos. As relações das discrepâncias (planimétricas e altimétricas) estão disponíveis nos Anexos A e B.

Tabela 5.1 – Resumo das estatísticas de validação do MDE ASTER.

MDE ASTER				
	E	N	Resultante	H
Nº de amostras	28	28	28	109
$\Delta_{\text{mínimo}}$ (m)	-53,60	-16,70	8,33	-18,40
$\Delta_{\text{máximo}}$ (m)	26,70	35,25	53,78	30,60
$\bar{\Delta}$ (m)	-0,64	8,80	21,38	4,14
S_{Δ} (m)	19,12	11,12	9,79	8,40
EMQ (m)	19,13	14,28	23,87	9,38
t_{amostral}	0,178	4,185	11,555	5,146
$t(n-1,5\%)$	1,703	1,703	1,703	1,659
χ^2_{classeA} (1:100.000)	21,941	7,417	5,752	27,460
χ^2_{classeA} (1:50.000)	87,764	29,668	23,007	171,625
χ^2_{classeB} (1:50.000)	31,595	10,681	8,283	119,184
χ^2_{classeA} (1:25.000)	351,056	118,672	92,029	686,501
χ^2_{classeB} (1:25.000)	126,380	42,722	33,130	476,737
$\chi^2_{(n-1,10\%)}$	36,741	36,741	36,741	127,211

Os números em azul representam os valores de referência das estatísticas “t” de *Student* e Qui-quadrado. Esta última utilizou o EP mencionado na Seção 4.2.2.1.1. Com relação aos números em verde, esses são os resultados que atenderam às hipóteses nulas dos testes mencionados na Seção 2.5.1 (“t” de *Student* e Qui-quadrado).

Observa-se que somente a componente E foi aceita no teste de tendência. Com relação à precisão altimétrica, o MDE foi classificado como PEC A, escala 1:100.000, e PEC B, escala 1:50.000. No que diz respeito à precisão planimétrica, as componentes E e N, foram classificadas como PEC A, escala 1:100.000, e PEC B, escala 1:50.000. A resultante planimétrica obteve resultados que a classificam como PEC A, escala 1:50.000, e PEC B, escala 1:25.000. Porém, como a resolução espacial média do subsistema VNIR limita o conteúdo informativo das imagens e MDEs, não é adequada a utilização desses produtos em escalas maiores que 1:50.000.

Em suma, de acordo com a metodologia e valores de referência utilizados, o MDE ASTER é adequado para mapeamentos topográficos na escala de 1:100.000. Porém, a partir dos resultados planimétricos, verifica-se a possibilidade do emprego desse produto em mapeamentos temáticos (sem exigência de precisão altimétrica) na escala de 1:50.000.

A última parte dos resultados da validação do MDE ASTER se refere à acurácia vertical relativa, detalhada na Seção 2.5.2. Os resultados obtidos, a partir dos dois conjuntos de 5886 pares de pontos, são resumidos na Tabela 5.2. A Figura 5.3 destaca a variabilidade das diferenças obtidas, para cada par de pontos. Gesch (2007) não aponta valores de referência para avaliação dos resultados. Desse modo, nesta pesquisa, as estatísticas descritivas serviram de informações acessórias que auxiliaram no conhecimento do dado (MDE).

Tabela 5.2 – Estatísticas (em metros) obtidas da análise da acurácia vertical relativa.

Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Mediana
0,0010	48,9660	8,9110	7,4222	7,0135

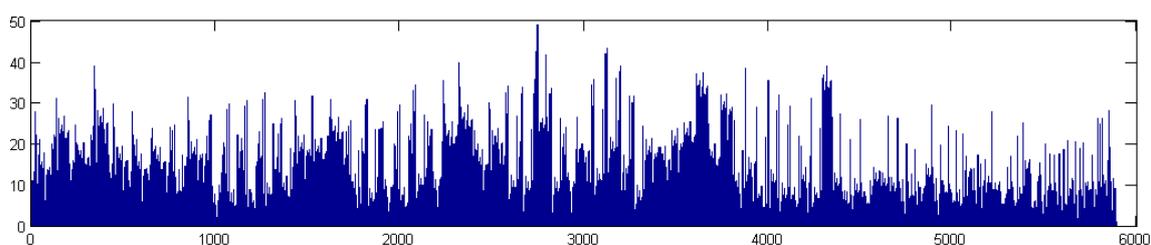


Figura 5.3 – Distribuição das diferenças (em metros, **na ordenada**) obtidas da análise da acurácia vertical relativa, para cada par de pontos (**na abscissa**).

5.2 Mapa geomorfológico de referência

Conforme salientado na Seção 4.2.1.2, a legenda do mapa geomorfológico destaca a morfogênese e a morfologia, por meio de denominações e cores. Acrescentaram-se, ainda, as principais características litológicas obtidas da carta geotécnica (mencionada na Seção 4.1). A legenda é detalhada no Quadro 5.1 e o mapa geomorfológico, obtido da interpretação visual do par estereoscópico ASTER/Terra, é apresentado na Figura 5.4.

Corpos d'água		
	Reservatório	-----
Formas de agradação		
	Planície aluvial tipo 1	Sedimentos argilo-arenosos.
	Planície aluvial tipo 2	Sedimentos arenosos.
	Terraços fluviais	Sedimentos argilo-arenosos
Formas de denudação		
	Colinas sedimentares tipo 1	Sedimentos arenosos.
	Colinas sedimentares tipo 2	Sedimentos argilo-arenosos.
	Colinas sedimentares tipo 3	Sedimentos arenosos.
Formas estruturais-denudacionais		
	Morros tipo 1	Migmatitos, gnaisses, xistos e filitos.
	Morros tipo 2	Migmatitos, gnaisses, xistos, filitos e suítes graníticas
	Morrotos	Migmatitos, gnaisses, xistos e filitos
	Montanhas tipo 1	Migmatitos, gnaisses, xistos e filitos, com predomínio de suítes graníticas.
	Montanhas tipo 2	Suítes graníticas.
	Montanhas tipo 3	Migmatitos, gnaisses, xistos e filitos, com predomínio de suítes graníticas.
	Montanhas tipo 4	Migmatitos, gnaisses, xistos e filitos.
	Serra escarpada tipo 1	-----
	Serra escarpada tipo 2	-----

Quadro 5.1 – Legenda do mapa geomorfológico obtido da interpretação visual (células com tracejado representam ausência de informação na carta geotécnica).

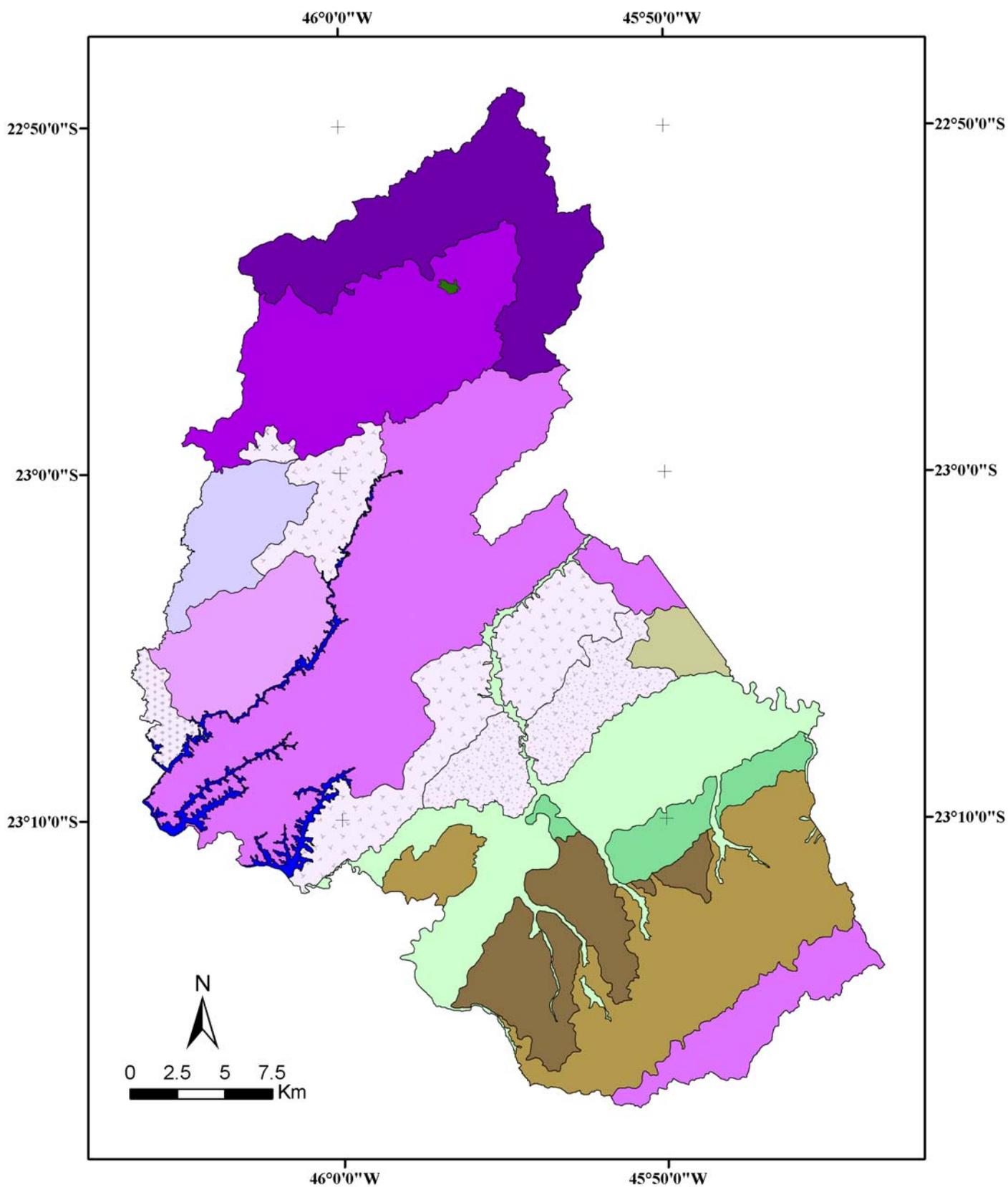


Figura 5.4 – Mapa geomorfológico obtido da interpretação visual.

5.3 Classificação das macro-unidades geomorfológicas

5.3.1 Segmentação

Na segmentação das macro-unidades geomorfológicas, inicialmente, foram extraídos os corpos d'água (nível 1) por meio da variável e parâmetros mencionados na Seção 4.2.3.2.1. A Figura 5.5 destaca um exemplo dos resultados da segmentação dos corpos d'água.

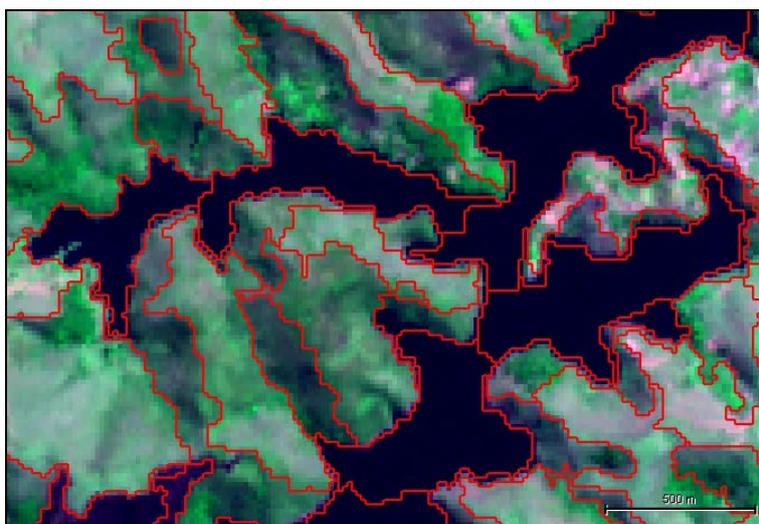


Figura 5.5 – Exemplo dos resultados da segmentação dos corpos d'água.

Posteriormente, foram segmentadas as feições empregadas na extração da densidade de drenagem. Primeiro, foram extraídos os canais fluviais e, depois, as células utilizadas no cálculo. As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam os resultados obtidos.

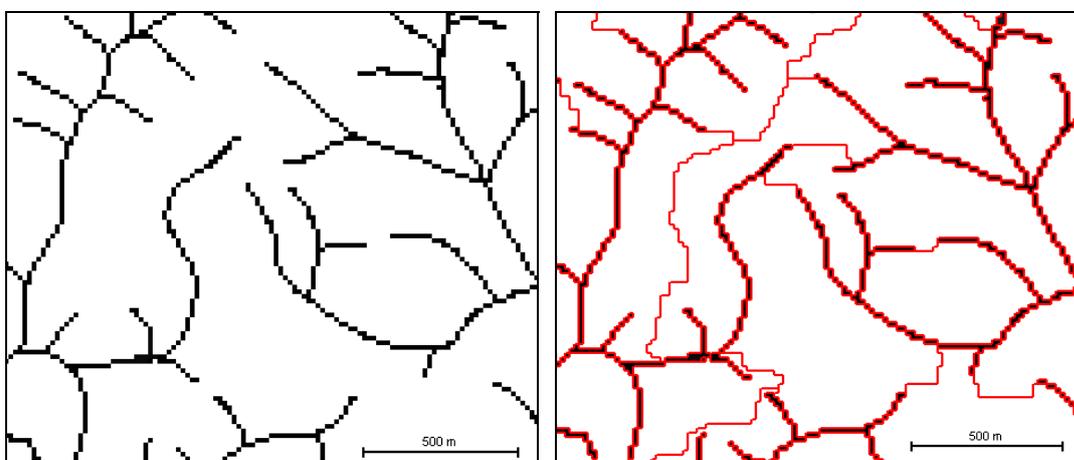


Figura 5.6 - Exemplo de resultado da segmentação da imagem temática da rede de drenagem.

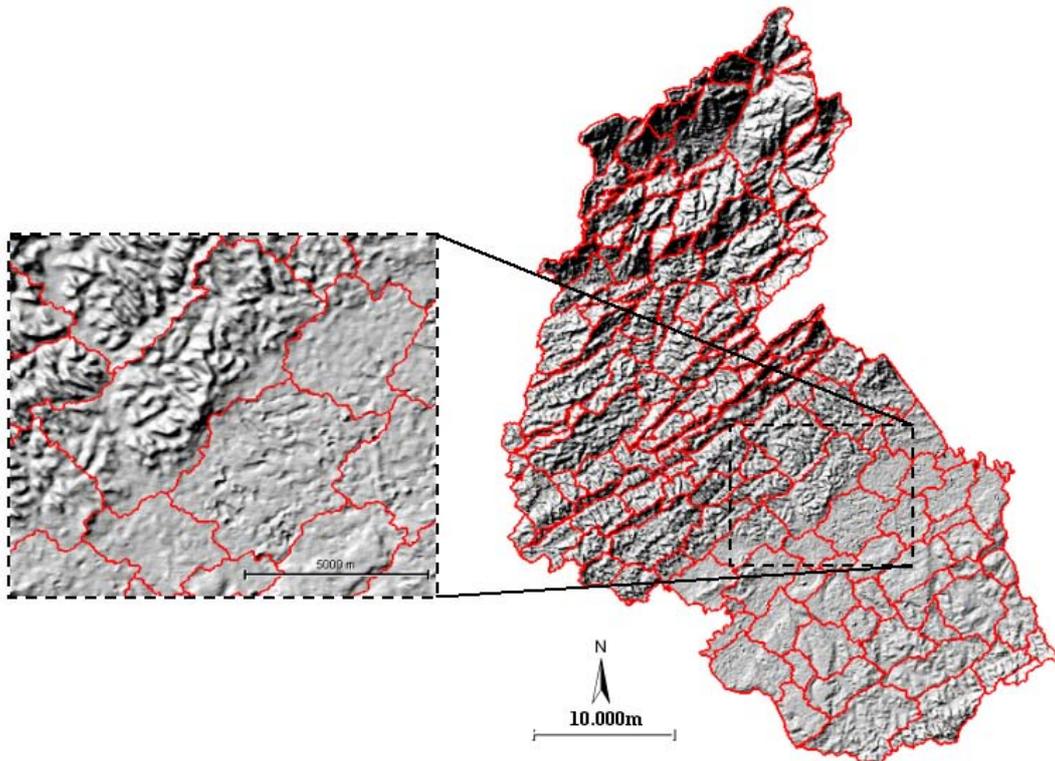


Figura 5.7 – Células, obtidas da segmentação do relevo sombreado, empregadas no cálculo da densidade de drenagem.

Na seqüência, realizou-se a segmentação das macro-unidades geomorfológicas por meio do MDE ASTER e dos parâmetros destacados na Seção 4.2.3.2.1. A Figura 5.8 apresenta os aspectos gerais dos segmentos obtidos. Na Figura 5.9, destaca-se a edição efetuada em objeto que ocupava duas unidades geomorfológicas distintas.

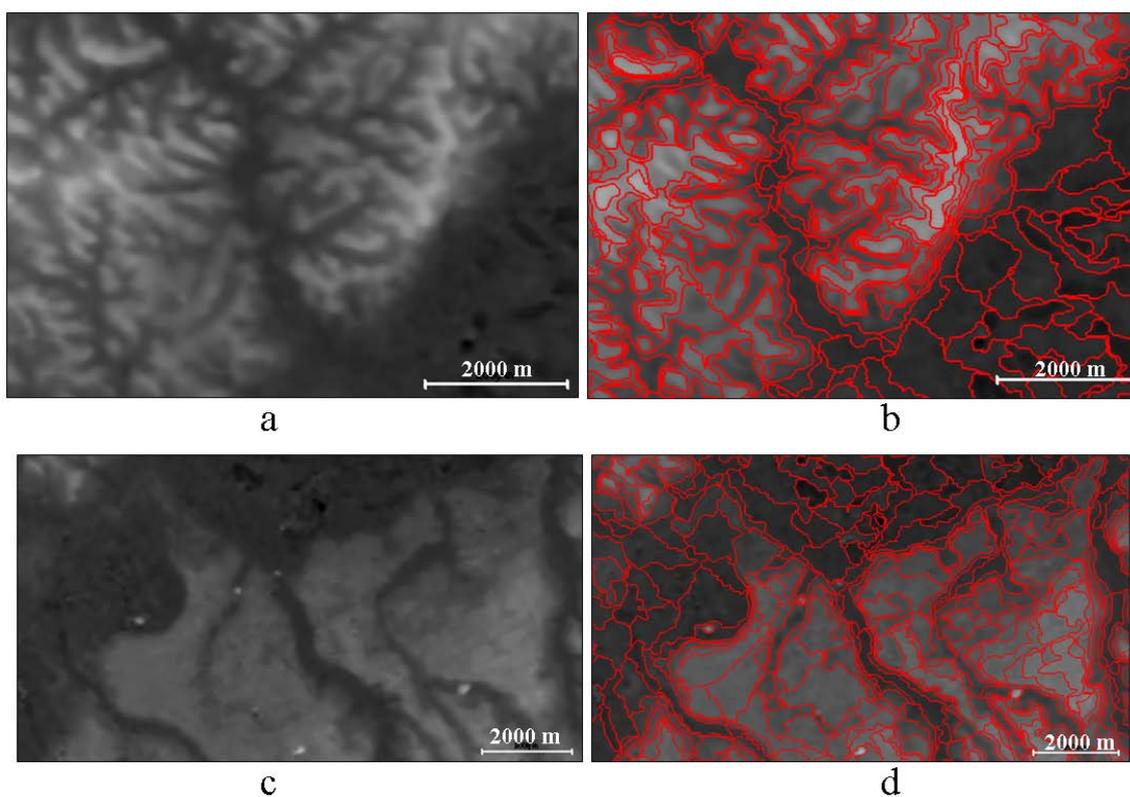


Figura 5.8 – Exemplo de resultados obtidos da segmentação do MDE ASTER.

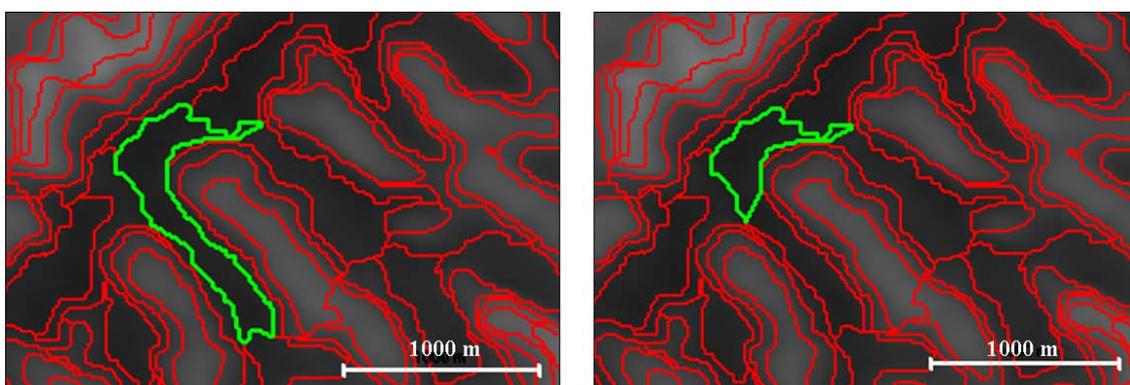


Figura 5.9 – Edição realizada na segmentação obtida do MDE ASTER.

5.3.2 Classificação e pós-processamentos

De início, foram classificados os corpos d'água por meio de uma função *fuzzy* com valores de níveis de cinza da banda 3N. Esses valores compreendem o intervalo entre 14 e 46. Porém, verificou-se que sombras e áreas úmidas estavam sendo incorretamente classificadas como corpos d'água. Desse modo, a partir do operador *fuzzy* AND,

explorou-se o contexto altimétrico dos corpos d'água de interesse (reservatórios). Esses se localizam entre as cotas médias de 609 e 707 m. Assim, a combinação das duas funções (média da banda 3N e média do MDE/altimetria) diminuiu substancialmente os erros da classificação dos corpos d'água. As funções *fuzzy* utilizadas se encontram no Anexo D. A Figura 5.10 destaca o processo de classificação dos corpos d'água. Na Figura 5.11, são apresentados alguns exemplos dos resultados da classificação dos corpos d'água. Os erros que permaneceram foram editados manualmente.

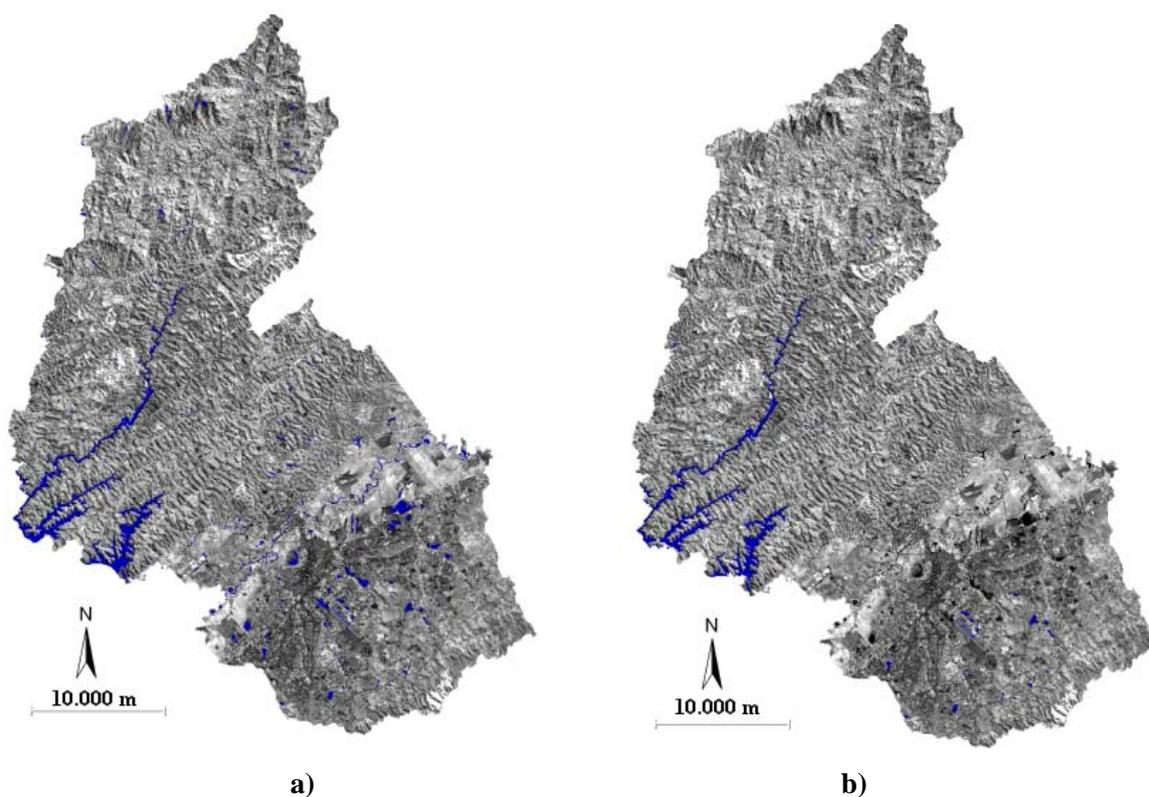


Figura 5.10 – Classificação dos corpos d'água utilizando valores de nível de cinza da banda 3N (média por objeto) (a) e refinamento da classificação a partir da consideração da posição altimétrica (média do MDE por objeto) (b).

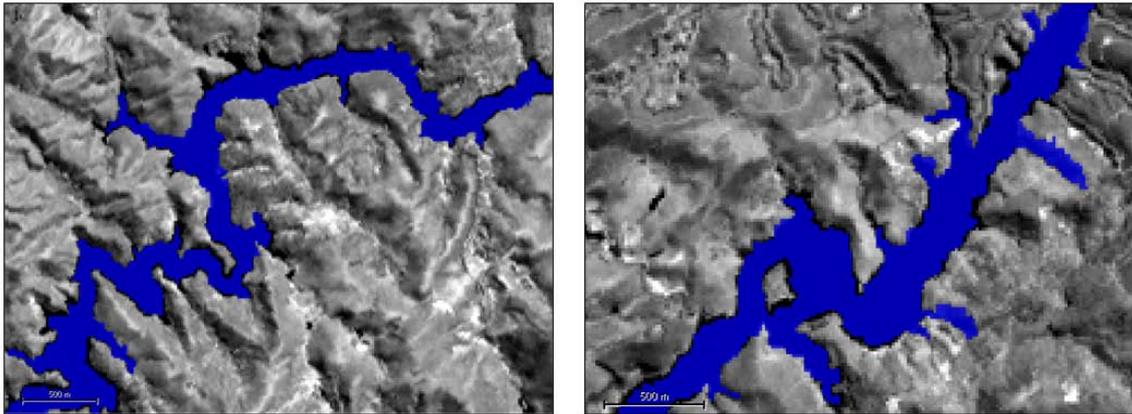


Figura 5.11 – Exemplos dos resultados obtidos da classificação dos corpos d’água.

Para a densidade de drenagem, inicialmente, foram classificados os canais obtidos da segmentação da imagem temática da rede de drenagem. Para isso, explorou-se, também, o operador *fuzzy* AND e os valores de nível de cinza da imagem temática. A Figura 5.12 destaca a classificação dos canais de drenagem.

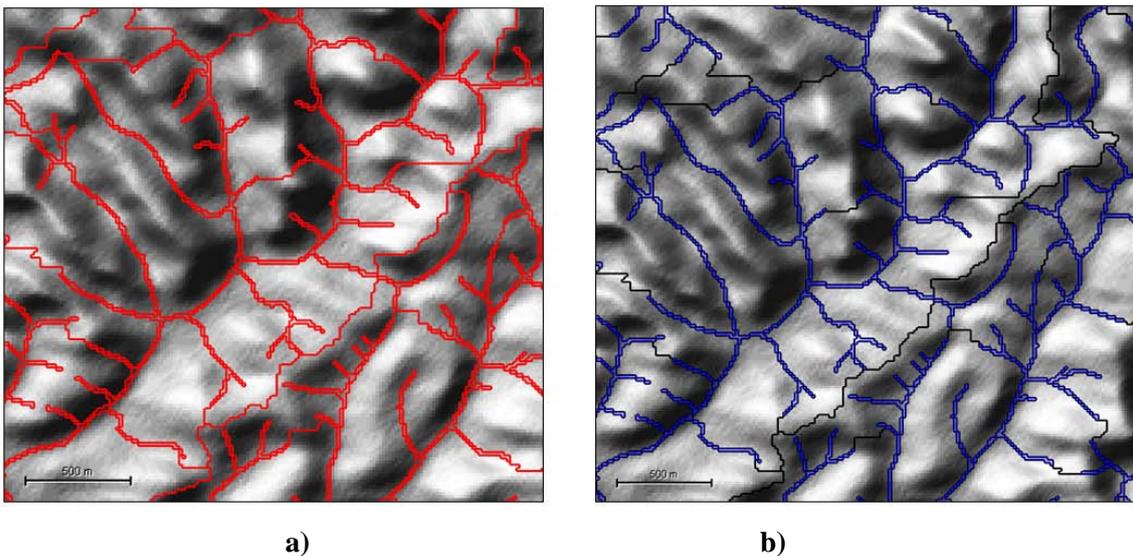


Figura 5.12 – Segmentos obtidos da imagem temática da rede de drenagem (a) e classificação dos canais de drenagem (b) empregada no cálculo da densidade de drenagem.

Posteriormente, calculou-se a área relativa dos canais para cada célula obtida da segmentação do relevo sombreado (ver Figura 5.7, Seção 5.3.1). A partir dos valores obtidos, empregou-se o operador *fuzzy* AND para a classificação da densidade de drenagem em “Alta” e “Baixa-Média”. Para o refinamento da classificação, também

foram empregadas subclasses representando os erros de comissão. As funções *fuzzy* utilizadas se encontram no Anexo E. A Figura 5.13 apresenta esse processo. Posteriormente, uma edição manual foi realizada na correção dos objetos que permaneceram classificados de forma errada.

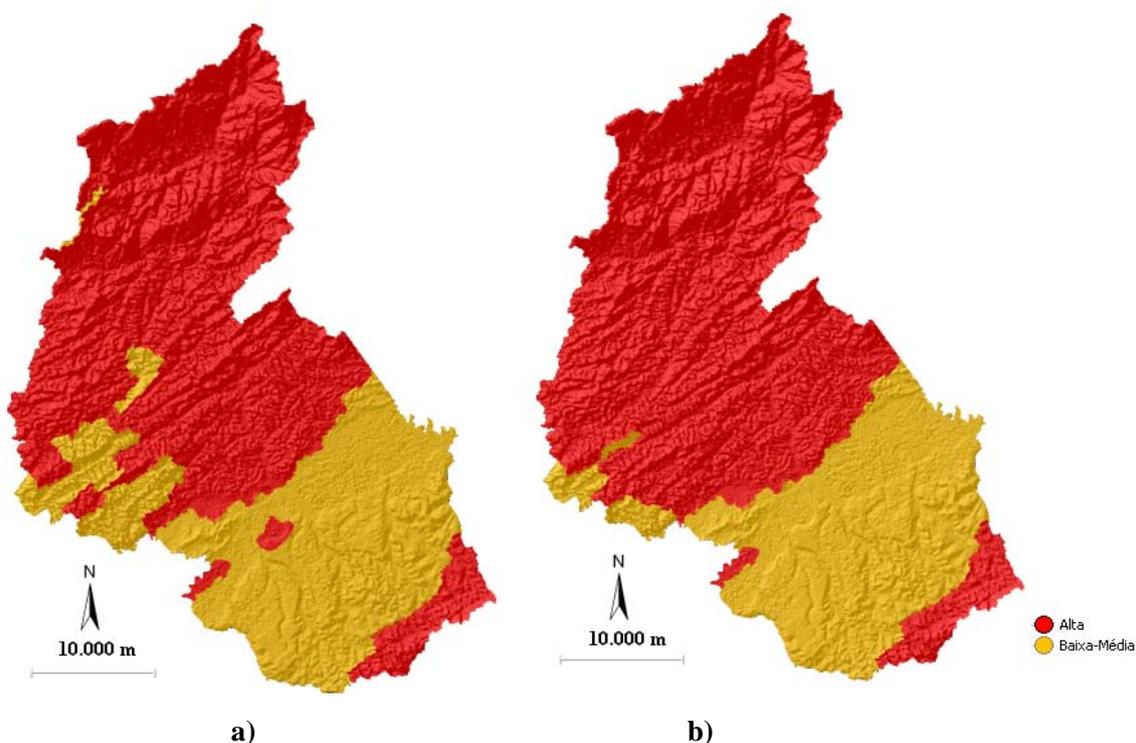


Figura 5.13 – Classificação da densidade de drenagem a partir da área relativa dos canais (a) e refinamento da classificação (b) a partir de subclasses representando os erros de comissão.

Posteriormente às classificações dos níveis 1 (corpos d'água) e 3 (densidade de drenagem), foram efetuados os procedimentos de classificação do nível 2 (macro-unidades geomorfológicas). De início, empregaram-se a rede semântica hierárquica descrita na Seção 4.2.3.2.3 e os atributos mencionados na Seção 4.2.3.2.2 (com suas respectivas funções *fuzzy* do Anexo F). A Figura 5.14 destaca os resultados iniciais da classificação das macro-unidades geomorfológicas.

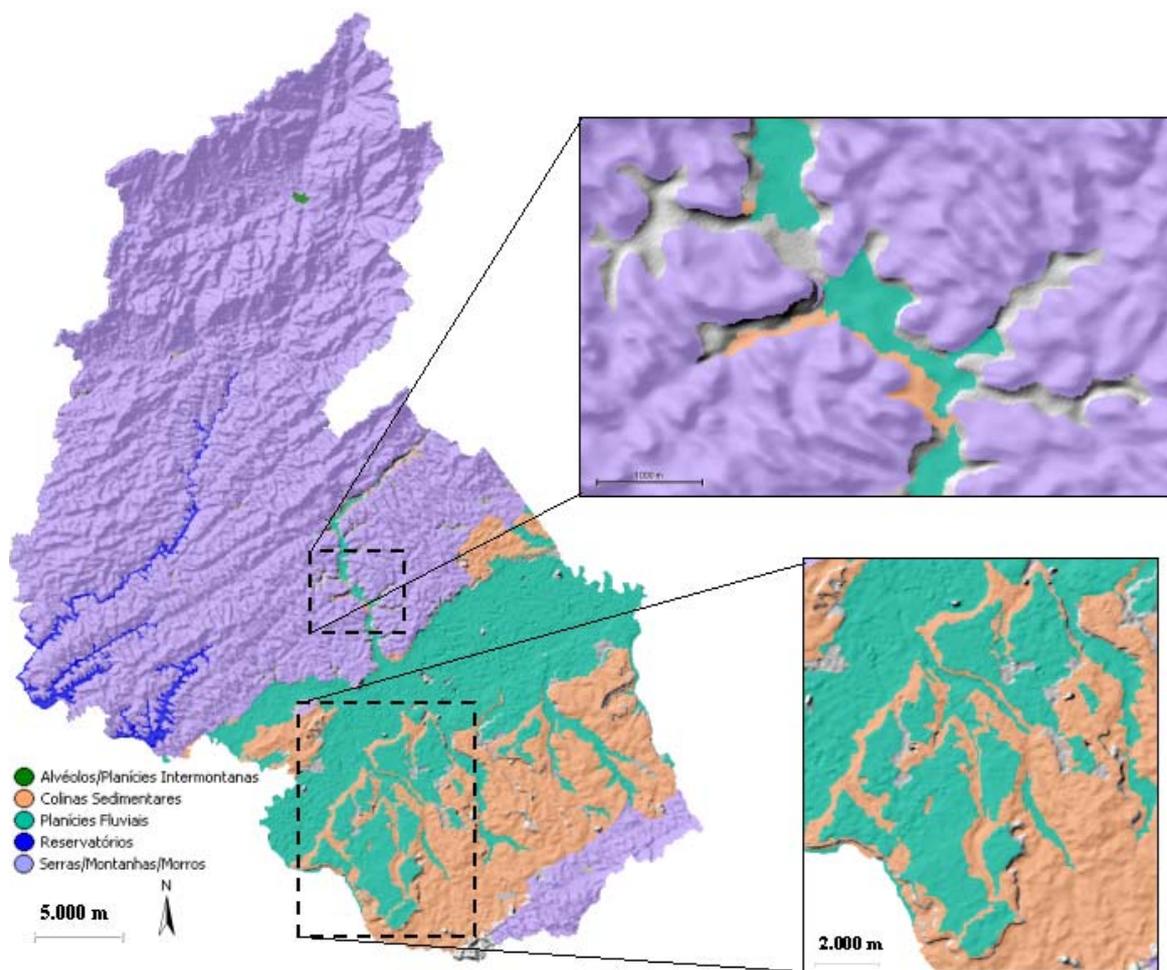


Figura 5.14 – Resultados iniciais da classificação das macro-unidades geomorfológicas.

As feições cinzas, nas ampliações, representam objetos não-classificados. Observa-se a confusão entre as classes “Colinas Sedimentares” e “Planícies Fluviais”. Isso ocorre principalmente em áreas de colinas tabuliformes (região sul do município) devido à similaridade entre os atributos de ambas as classes.

A maneira encontrada para minimizar a confusão foi o emprego de subclasses que separam os acertos reais e os erros de comissão. Essa estratégia, utilizada na classificação, possibilitou obter os resultados apresentados na Figura 5.15.

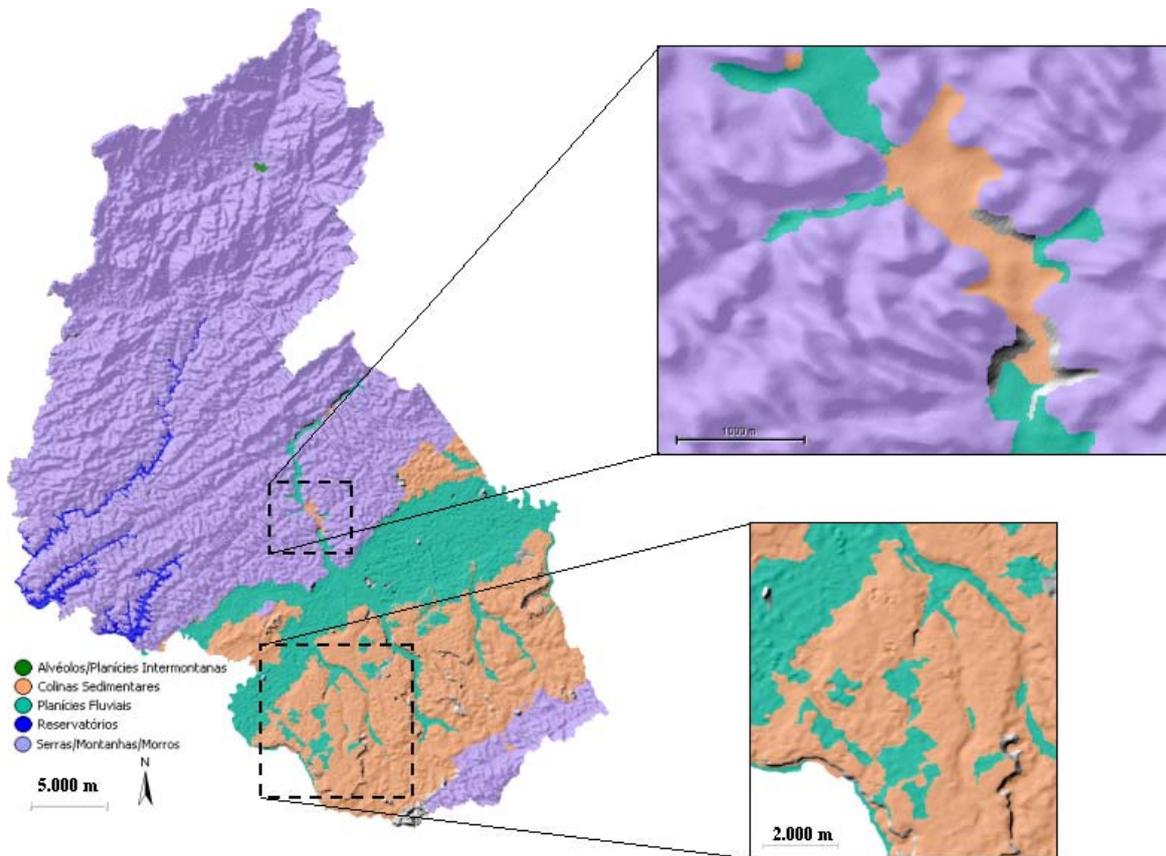


Figura 5.15 – Resultados obtidos a partir da criação das subclasses de erros de comissão.

As subclasses de erros são representadas com as cores das suas classes corretas e, desse modo, por meio da análise visual, verifica-se a redução das confusões entre classes. Os atributos e funções *fuzzy*, utilizados nas classes de erros de comissão, são apresentados no Anexo F.

Por fim, o refinamento da classificação das macro-unidades geomorfológicas foi efetuado por meio da concatenação dos algoritmos *find enclosed by class* e *find local extrema*, conforme mencionado na Seção 4.2.3.3.4. Esses algoritmos reclassificaram objetos que atendiam a regras de vizinhança pré-estabelecidas. As ampliações da Figura 5.16 destacam alguns erros grosseiros, que permaneceram entre as classes “Serras/Montanhas/Morros” e “Colinas Sedimentares” (retângulo superior) e entre as classes “Planícies Fluviais” e “Colinas Sedimentares” (retângulo inferior).

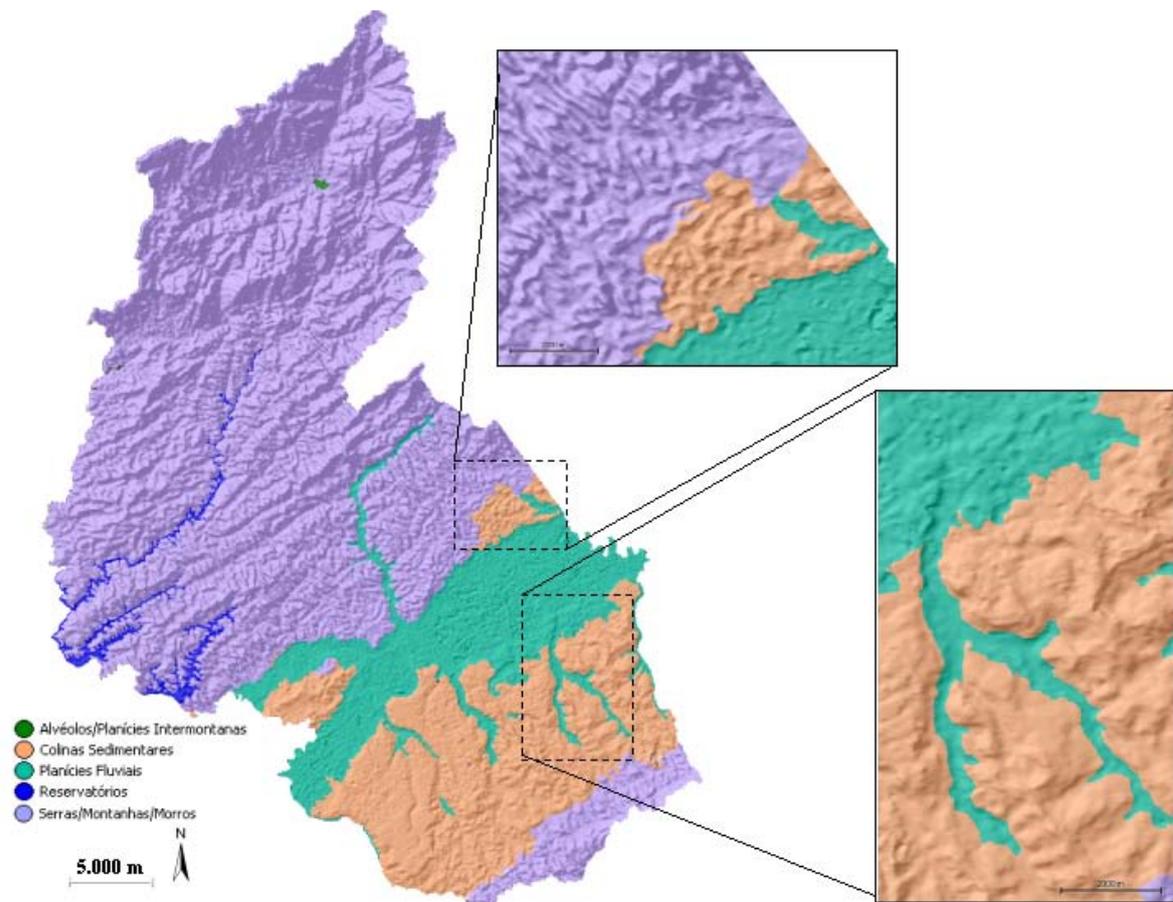


Figura 5.16 – Resultado final da classificação semi-automatizada das macro-unidades geomorfológicas.

5.4 Classificação das unidades geomorfológicas detalhadas

5.4.1 Segmentação

Inicialmente, as classes de erros de comissão, obtidas na classificação das macro-unidades geomorfológicas, foram agrupadas às suas classes corretas por meio do procedimento de segmentação baseada em classificação. Para isso, foi necessária a edição manual dos erros da primeira classificação. A Figura 5.17 apresenta o resultado desse processo.

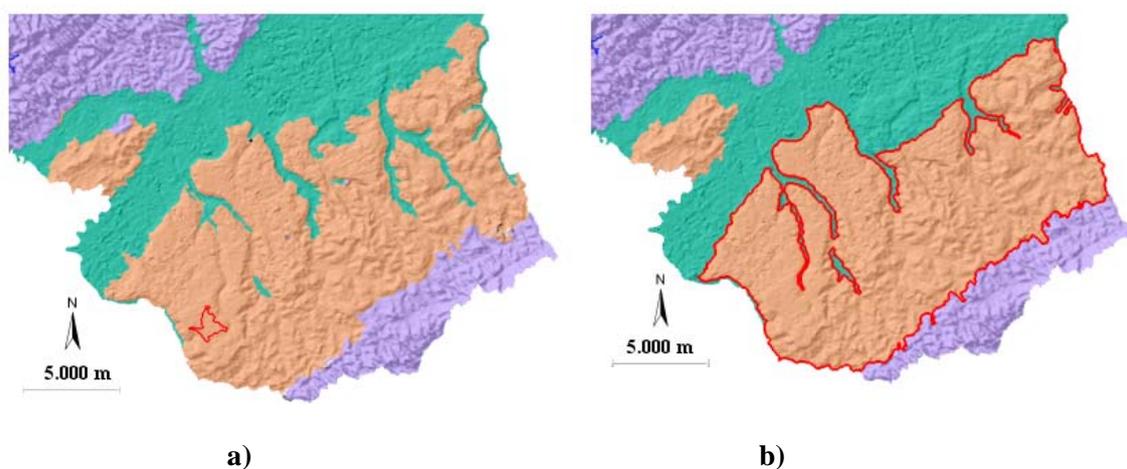


Figura 5.17 – Resultados da segmentação baseada em classificação: em (a) um exemplo dos objetos da segmentação das macro-unidades geomorfológicas e, em (b), esses objetos agrupados por classes.

Na seqüência, a rede semântica hierárquica foi reorganizada para a inserção do nível de segmentação das unidades geomorfológicas detalhadas (nível 1). Esse nível foi obtido da segmentação da imagem de relevo sombreado, por meio dos parâmetros mencionados na Seção 4.2.3.3.1. As Figuras 5.18 e 5.19 apresentam os principais resultados da segmentação.

No exemplo (a), da Figura 5.18, verifica-se que os limites da planície aluvial, obtidos na classificação das macro-unidades geomorfológicas, foram mantidos na segmentação das unidades geomorfológicas detalhadas. Observa-se, em todos os exemplos da Figura 5.18, a concordância entre as rupturas do relevo (talvegues e interflúvios) e os vetores obtidos.

Na Figura 5.19, são apresentadas as principais edições (tracejados em verde) realizadas nos objetos do nível das unidades geomorfológicas detalhadas. No exemplo (a), há a correção nos limites dos terraços fluviais; em (b), ocorre a edição dos limites das colinas tabulares; em (c) e (d), são apresentadas algumas correções de limites entre serras e montanhas.

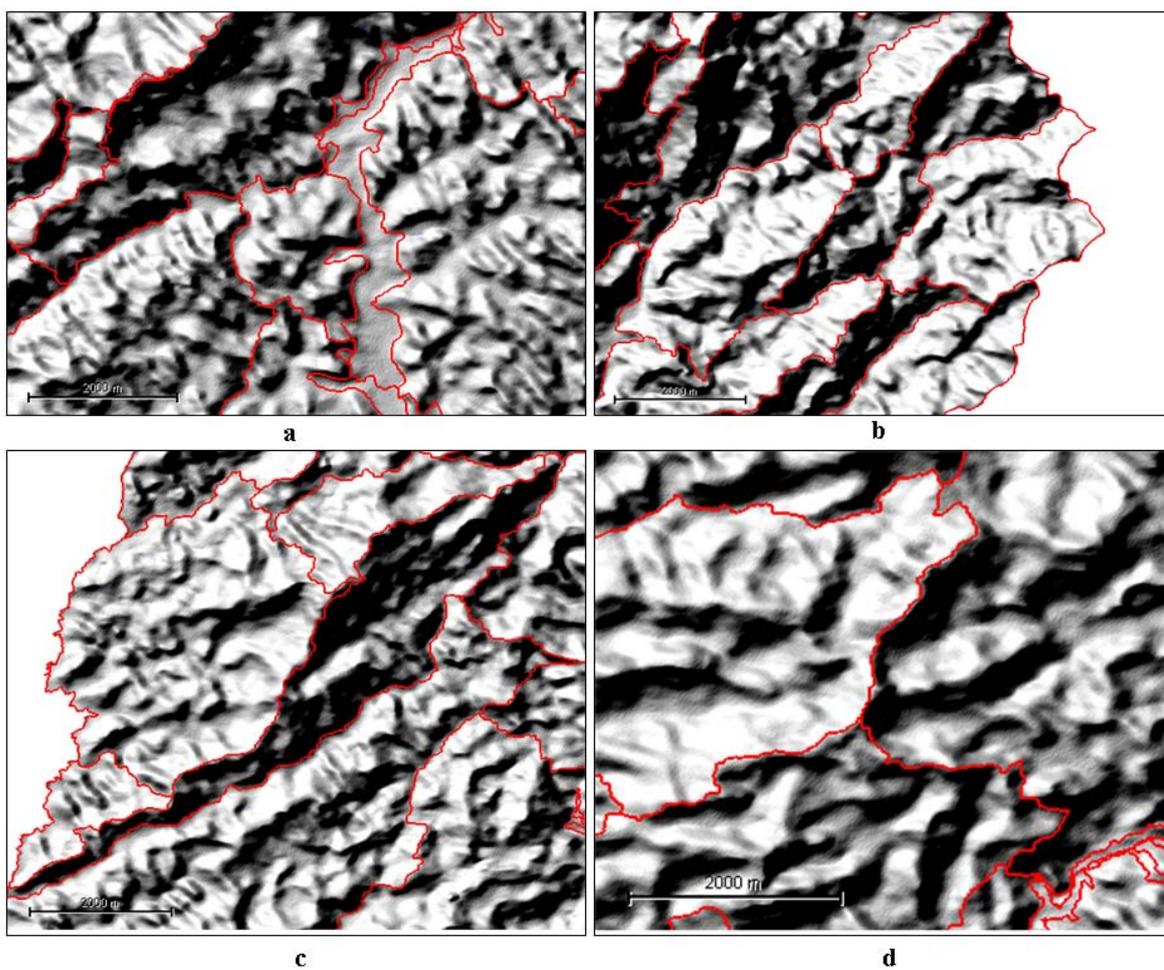


Figura 5.18 – Exemplos das delimitações obtidas da segmentação do relevo sombreado.

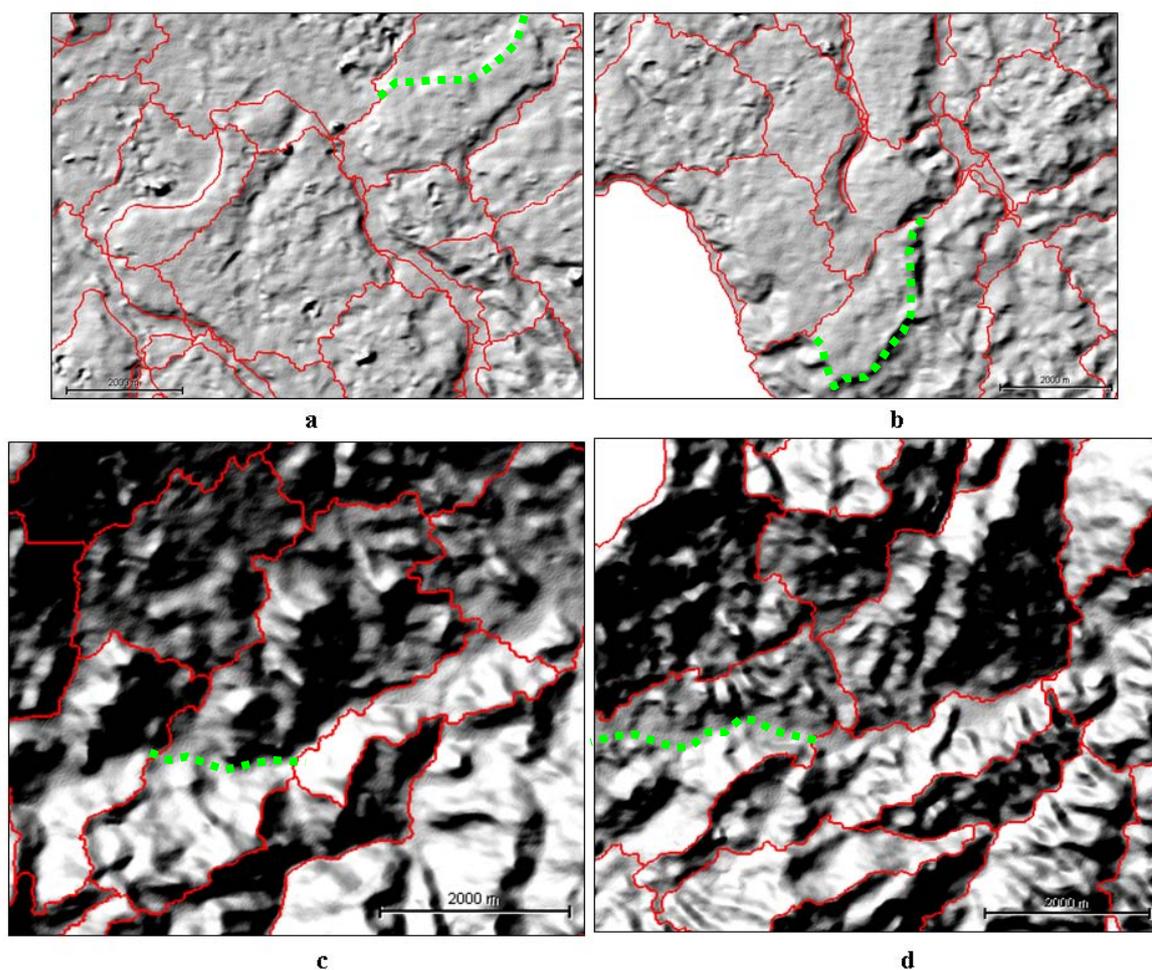


Figura 5.19 –Edições (tracejados em verde) realizadas na segmentação obtida do relevo sombreado.

5.4.2 Classificação e pós-processamentos

Em estratégias multi-níveis de segmentação e classificação de imagens, há sempre a necessidade de edição de erros de um determinado nível, para então se dar prosseguimento à classificação de um nível seguinte. Isso se faz necessário para que não ocorra a propagação dos erros na classificação final. Desse modo, antes de realizar esta última etapa, os erros do nível das macro-unidades geomorfológicas foram editados.

Assim, para a classificação das unidades geomorfológicas detalhadas, utilizou-se a rede semântica da Seção 4.2.3.3.3, os atributos (mencionadas na Seção 4.2.3.3.2) e as funções *fuzzy* do Anexo G. A Figura 5.20 apresenta os resultados iniciais do processo de classificação.

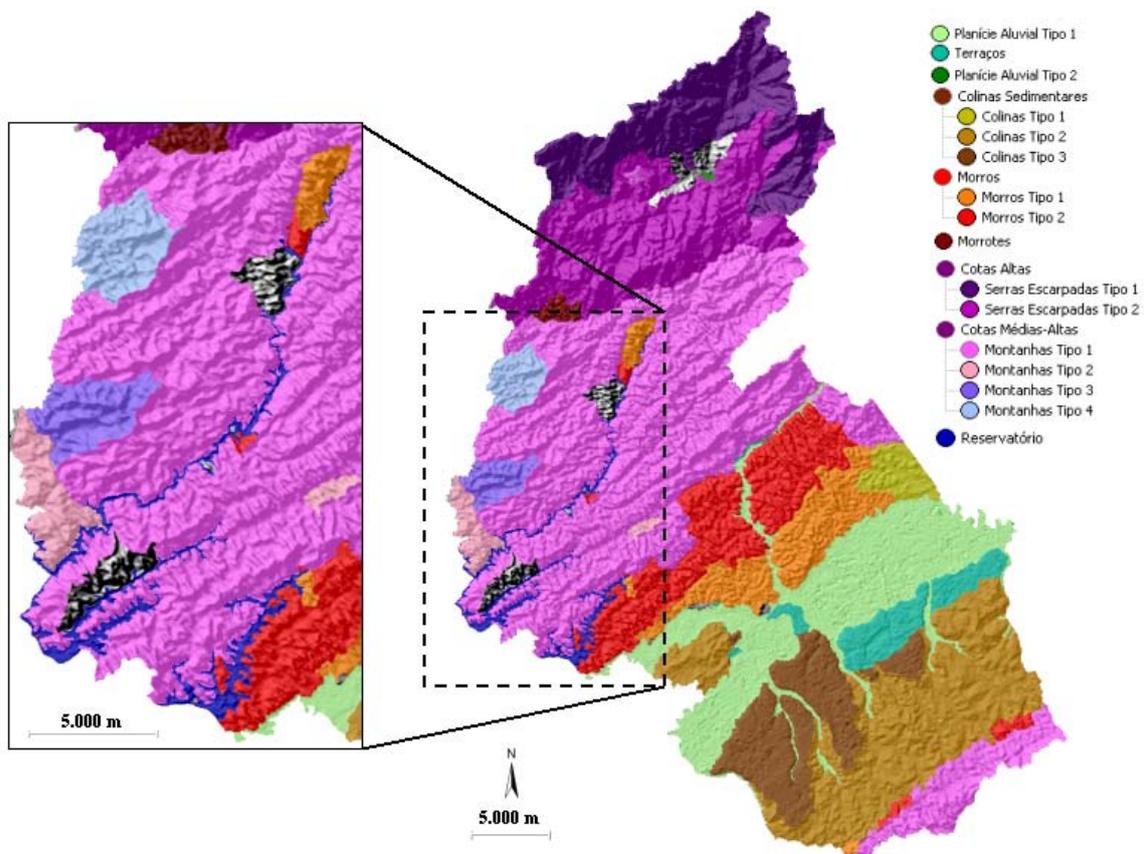


Figura 5.20 – Resultados iniciais da classificação das unidades geomorfológicas detalhadas.

A ampliação da Figura 5.20 destaca uma área onde ocorre confusão entre diferentes classes/padrões geomorfológicos. Nesta figura, as feições em cinza-escuro são objetos não-classificados. Para resolver a confusão, foram criadas subclasses de erros de comissão, do mesmo modo da classificação das macro-unidades geomorfológicas (Seção 5.3.2). Desse modo, as subclasses de erros empregaram como atributos a diferença média dos valores de altimetria dos objetos, o desvio-padrão do fluxo acumulado e a variância da curvatura vertical. As funções *fuzzy* são apresentadas em detalhe no Anexo G. Os resultados desse refinamento são apresentados na Figura 5.21.

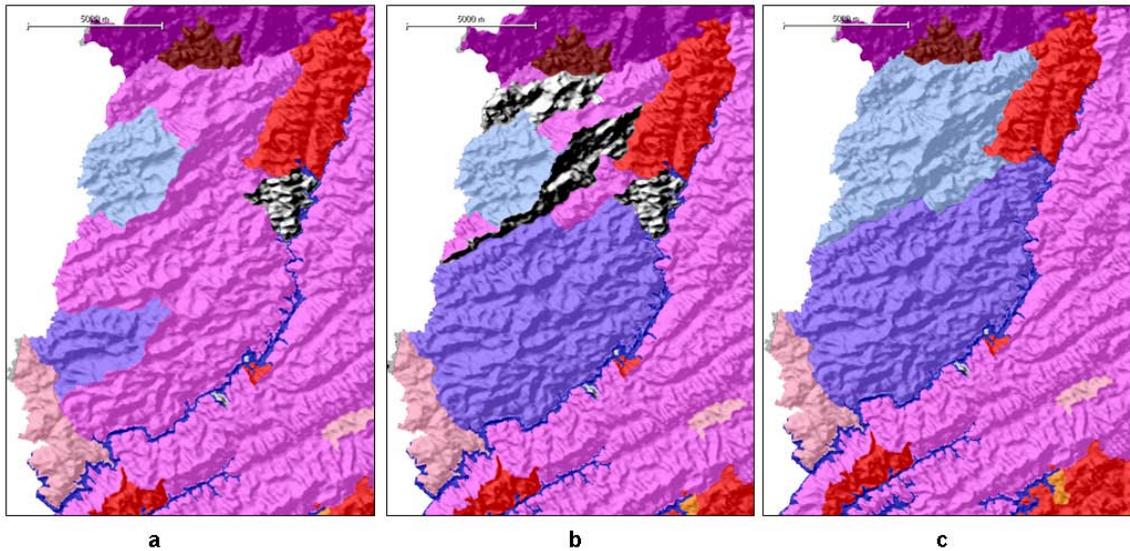


Figura 5.21 – Decréscimo da confusão a partir do aumento gradativo (entre **a** e **c**) de subclasses referentes aos erros de comissão.

Conforme salientado anteriormente, deve-se editar a classificação final de um nível para se prosseguir na classificação do nível seguinte. Porém, neste trabalho, realizou-se também uma classificação sem essa etapa intermediária de edição. Essa classificação foi usada para eliminar o viés na avaliação da acurácia e da estabilidade de classificação do nível fino (unidades detalhadas), introduzido por ajustes manuais feitos no nível grosseiro (macro-unidades). Foram utilizados os mesmos atributos, as mesmas funções *fuzzy* e a mesma rede semântica hierárquica. A Figura 5.22 apresenta os resultados obtidos. A ampliação destaca alguns erros da classificação das macro-unidades geomorfológicas que se propagaram na classificação final.

O pós-processamento da classificação das unidades geomorfológicas detalhadas foi realizado por meio da concatenação de algoritmos do tipo *find enclosed by class*, conforme mencionado na Seção 4.2.3.3.4. Esses algoritmos reclassificaram objetos que atendiam a regras de vizinhança pré-estabelecidas. Na Figura 5.23, são apresentadas as duas classificações das unidades geomorfológicas detalhadas, com e sem o processo de edição intermediário.

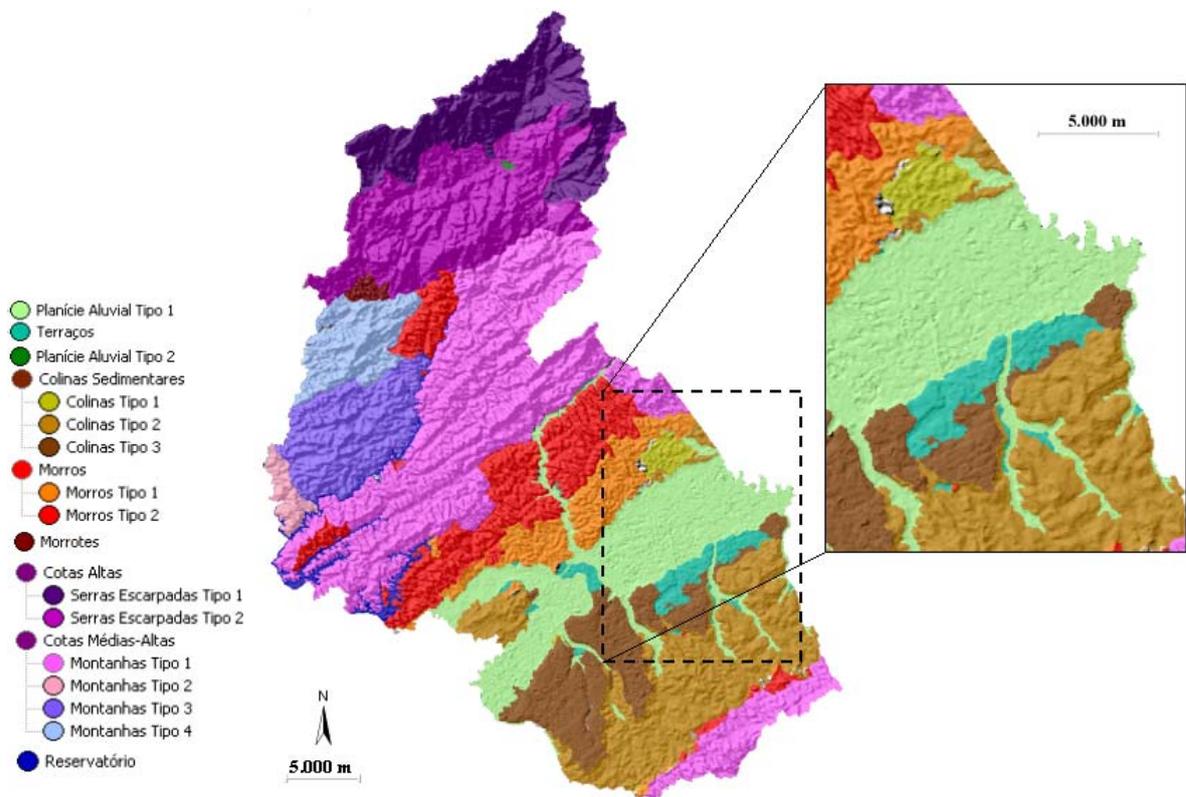


Figura 5.22 – Classificação das unidades geomorfológicas detalhadas sem procedimento intermediário de edição.

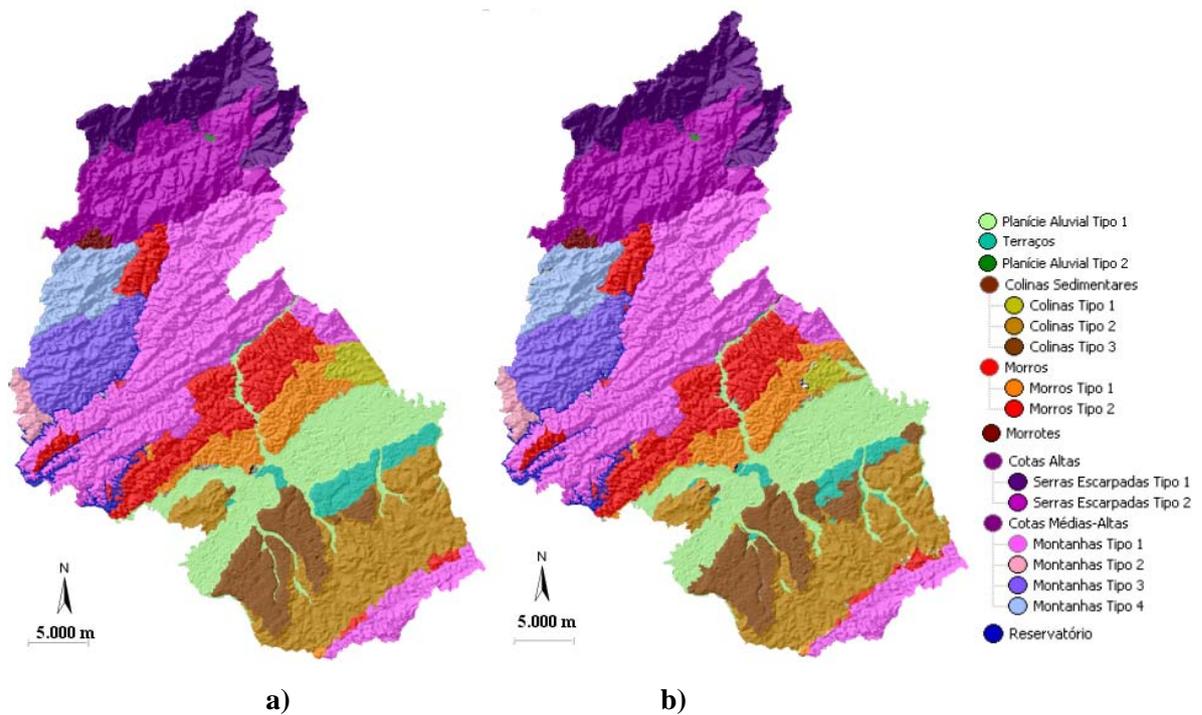


Figura 5.23 – Classificações das unidades geomorfológicas detalhadas: (a) com procedimento intermediário de edição e (b) sem procedimento intermediário de edição.

5.5 Análise das incertezas e validação das classificações

De início, foram calculadas as diferenças entre o maior e o segundo maior valor de pertinência *fuzzy*. A partir disso, foi possível verificar regiões de alta e de baixa estabilidade e, por conseguinte, as incertezas da classificação. A estabilidade foi avaliada, em todos os casos, antes da aplicação das rotinas de pós-processamento.

Posteriormente, as classificações foram comparadas ao mapa geomorfológico de referência (Seção 5.2) e foram construídas as matrizes de erros. A partir dessas matrizes, foram extraídos indicadores estatísticos da qualidade das classificações (acurácia global, índice Kappa, acurácia do produtor e acurácia do usuário).

A Figura 5.24 mostra as diferenças *fuzzy* para a classificação das macro-unidades geomorfológicas. Na Tabela 5.3, é apresentada a matriz de erros da classificação das macro-unidades geomorfológicas e os resultados da acurácia global e do índice Kappa. Na Tabela 5.4, são destacadas as acurácias do produtor e do usuário, para cada macro-unidade geomorfológica.

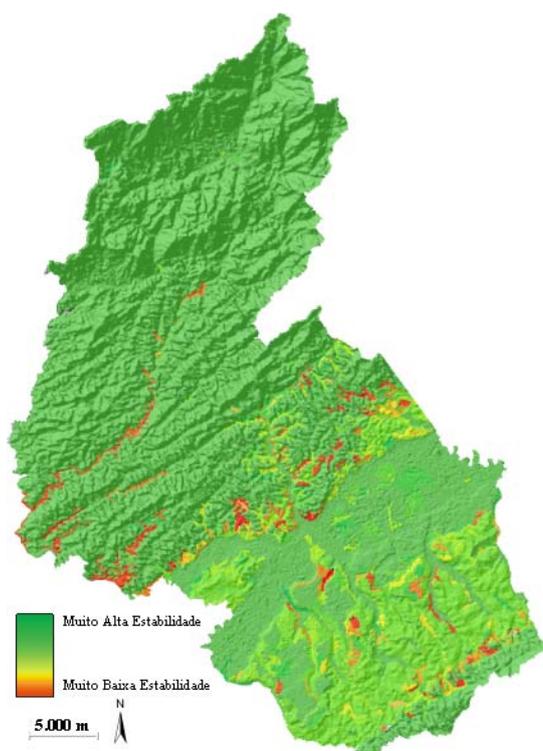


Figura 5.24 – Estabilidade da classificação das macro-unidades geomorfológicas.

Tabela 5.3 – Matriz de erros da classificação das macro-unidades geomorfológicas.

		Referência			
		Serras/Montanhas/Morros	Colinas Sedimentares	Planícies Fluviais	Alvéolos/Planícies Intermontanas
Classificação	Serras/Montanhas/Morros	4341	44	11	0
	Colinas Sedimentares	37	622	49	0
	Planícies Fluviais	18	38	284	0
	Alvéolos/Planícies Intermontanas	0	0	0	2
	Intermontanas				

Acurácia Global: 0,9638

Índice Kappa: 0,8896

Tabela 5.4 – Acurácias do produtor e do usuário para cada macro-unidade geomorfológica.

	Acurácia do produtor	Acurácia do usuário
Serras/Montanhas/Morros	0,987	0,987
Colinas Sedimentares	0,884	0,879
Planícies Fluviais	0,826	0,835
Alvéolos/Planícies Intermontanas	1,000	1,000

Observa-se, na Figura 5.24, o predomínio de objetos estáveis. Com relação ao índice Kappa, este apresenta “forte concordância” (LANDIS; KOCH, 1977). No que diz respeito às acurácias do produtor e do usuário, essas também apontam adequada concordância entre a classificação e os dados de referência.

Os objetos referentes aos reservatórios apresentam muito baixa estabilidade (Figura 5.24). Isto se deve à concorrência entre as classes Serras/Montanhas/Morros e Reservatórios. Esses objetos (referentes aos reservatórios) apresentaram alta pertinência *fuzzy* à classe Serras/Montanhas/Morros, pois, estão localizados em áreas de alta densidade de drenagem (um dos atributos empregados pela classe Serras/Montanhas/Morros) e, também, alta pertinência *fuzzy* à classe Reservatórios, devido à utilização do atributo “existência de corpos d’água” no nível de segmentação 1. Infelizmente, não foi possível verificar o relacionamento dessas instabilidades com os erros e acertos da classificação, pois, a classe Reservatórios não foi considerada na matriz de erros.

Verificaram-se também, na Figura 5.24, áreas de baixa estabilidade na classe de Colinas Sedimentares. Esses baixos valores de estabilidade foram ocasionados pela concorrência entre essa classe e a classe Planícies Fluviais. Isso é corroborado pela confusão entre essas classes (observada na Tabela 5.3).

Porém, é importante salientar que nem sempre muito baixa estabilidade consiste em erros de classificação e confusão entre classes. Observa-se, na Tabela 5.4, que, apesar da baixa estabilidade na classe Colinas Sedimentares, as acurácias do produtor e do usuário foram superiores a 80%.

Com relação às classificações das unidades geomorfológicas detalhadas, a Figura 5.25 mostra as diferenças *fuzzy* e, por conseguinte, as estabilidades dos objetos. Nas Tabelas 5.5 e 5.6, são apresentadas as matrizes de erros das classificações das unidades geomorfológicas detalhadas. Por fim, nas Tabelas 5.7 e 5.8, são destacadas as respectivas acurácias do produtor e do usuário dessas classificações.

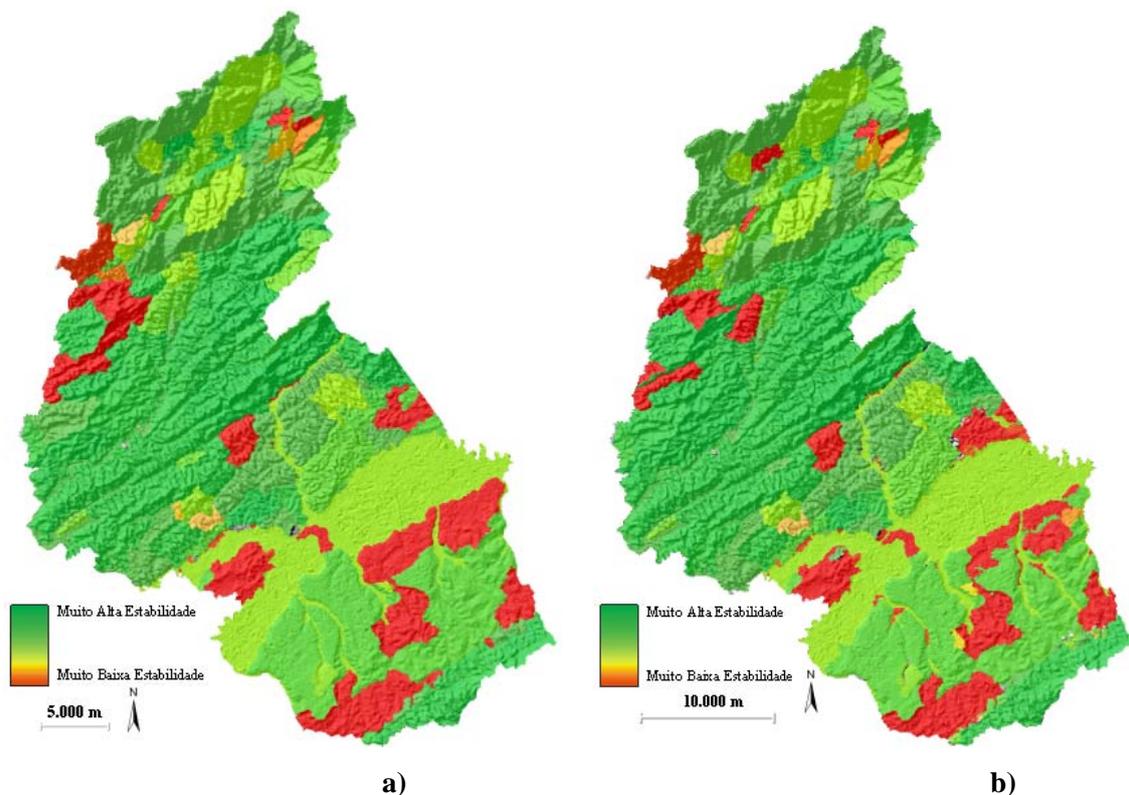


Figura 5.25 – Estabilidade da classificação das unidades geomorfológicas detalhadas: a) com edição temática das macro-unidades geomorfológicas e b) sem edição temática das macro-unidades geomorfológicas.

Tabela 5.5 – Matriz de erros da classificação das unidades geomorfológicas detalhadas, com edição temática das macro-unidades geomorfológicas.

		Referência														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Classificação	1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2	0	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3	0	2	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	4	0	0	0	12	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0
	5	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	0	0	0	0	0	0	72	0	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	0	0	0	0	0	9	15	0	0	0	0	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	1	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	24	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	59	0	0	0
	13	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	6	1	0
	14	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3

Legenda
 1= Colinas Tipo 1
 2= Colinas Tipo 2
 3= Colinas Tipo 3
 4= Morros Tipo 1
 5= Morros Tipo 2
 6= Morrotes
 7= Planícies Aluviais Tipo 1
 8= Terraços
 9= Planícies Aluviais Tipo 2
 10= Serras Escarpadas Tipo 1
 11= Serras Escarpadas Tipo 2
 12= Montanhas Tipo 1
 13= Montanhas Tipo 2
 14= Montanhas Tipo 3
 15= Montanhas Tipo 4

Acurácia Global: 0,9011
Índice Kappa: 0,8869

Tabela 5.6 – Matriz de erros da classificação das unidades geomorfológicas detalhadas, sem edição temática das macro-unidades geomorfológicas.

		Referência														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Classificação	1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
	2	3	40	0	2	1	0	4	0	0	0	0	7	0	0	0
	3	0	2	18	0	0	0	4	7	0	0	0	0	0	0	0
	4	3	2	1	7	2	0	4	0	0	0	0	2	0	0	0
	5	0	3	0	2	24	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0
	6	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	7	2	13	4	3	1	0	67	1	0	0	0	0	0	0	0
	8	0	9	1	0	1	0	7	10	0	0	0	3	0	0	0
	9	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	13	1	0	0	0	0
	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	24	0	0	0	0
	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	60	0	0	0
	13	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	6	1	0
	14	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0
	15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3

Legenda
 1= Colinas Tipo 1
 2= Colinas Tipo 2
 3= Colinas Tipo 3
 4= Morros Tipo 1
 5= Morros Tipo 2
 6= Morrotes
 7= Planícies Aluviais Tipo 1
 8= Terraços
 9= Planícies Aluviais Tipo 2
 10= Serras Escarpadas Tipo 1
 11= Serras Escarpadas Tipo 2
 12= Montanhas Tipo 1
 13= Montanhas Tipo 2
 14= Montanhas Tipo 3
 15= Montanhas Tipo 4

Acurácia Global: 0,706897
Índice Kappa: 0,6641

Tabela 5.7 – Acurácias do produtor e do usuário para cada unidade geomorfológica detalhada.

	Acurácia do produtor	Acurácia do usuário
Colinas Tipo 1	1,000	1,000
Colinas Tipo 2	0,947	1,000
Colinas Tipo 3	1,000	0,905
Morros Tipo 1	1,000	0,800
Morros Tipo 2	0,909	0,770
Morrotes	1,000	1,000
Planícies Aluviais Tipo 1	0,889	1,000
Terraços	1,000	0,625
Planícies Aluviais Tipo 2	1,000	1,000
Serras Escarpadas Tipo 1	0,681	0,937
Serras Escarpadas Tipo 2	0,960	0,800
Montanhas Tipo 1	0,843	0,983
Montanhas Tipo 2	1,000	0,750
Montanhas Tipo 3	0,910	0,910
Montanhas Tipo 4	1,000	1,000

Tabela 5.8 – Acurácias do produtor e do usuário para cada unidade geomorfológica detalhada (obtidas sem procedimento de edição).

	Acurácia do produtor	Acurácia do usuário
Colinas Tipo 1	0,111	0,200
Colinas Tipo 2	0,571	0,702
Colinas Tipo 3	0,750	0,580
Morros Tipo 1	0,466	0,333
Morros Tipo 2	0,774	0,632
Morrotes	1,000	1,000
Planícies Aluviais Tipo 1	0,770	0,736
Terraços	0,555	0,323
Planícies Aluviais Tipo 2	1,000	1,000
Serras Escarpadas Tipo 1	0,619	0,930
Serras Escarpadas Tipo 2	0,960	0,774
Montanhas Tipo 1	0,732	0,984
Montanhas Tipo 2	1,000	0,750
Montanhas Tipo 3	0,900	0,900
Montanhas Tipo 4	1,000	1,000

Na Figura 5.25, observa-se o predomínio de objetos estáveis. Ainda, de acordo com Landis e Koch (1977), o índice Kappa da classificação com procedimento de edição é considerado como de “forte concordância” e, o da classificação sem procedimento de edição, é considerado de “moderada concordância”. Com relação à Tabela 5.7, as acurácias do produtor e do usuário mostram adequada concordância entre a classificação e os dados de referência. Por outro lado, na Tabela 5.8 as acurácias do produtor e do usuário, para algumas classes, foram prejudicadas pela propagação dos erros da classificação das macro-unidades geomorfológicas.

Em ambas as classificações (com e sem edição temática das macro-unidades geomorfológicas), objetos com muita baixa estabilidade predominaram nas classes Montanhas Tipo 3, Colinas (tipos 1, 2 e 3) e Terraços. Na classificação com edição temática das macro-unidades geomorfológicas, a muita baixa estabilidade dessas classes mencionadas não coincidiu com erros de comissão e/ou omissão. Haja vista a pouca confusão entre as classes, destacada na matriz de erros da classificação com edição temática das macro-unidades geomorfológicas (Tabela 5.5).

Por outro lado, na classificação sem edição temática das macro-unidades geomorfológicas, observa-se o aumento da confusão entre as classes. Com destaque

para as classes de Colinas Tipo 2, Planície Aluvial Tipo 1, Terraços e Morros Tipo 1 (ver Tabela 5.6). Essas confusões, coincidentemente, ocorrem em objetos que apresentam baixa/muito baixa estabilidade. Novamente, convém destacar que nem sempre muito baixa estabilidade implica em erros de classificação e confusão entre classes.

6 CONCLUSÕES

O objetivo geral desta pesquisa foi desenvolver uma metodologia semi-automatizada de mapeamento geomorfológico utilizando uma abordagem que se baseia em conhecimento especialista e variáveis derivadas de MDE ASTER/Terra. Face aos resultados obtidos, são destacadas as principais conclusões:

- a) O par estereoscópico do sensor ASTER/TERRA é um dado que reúne um conjunto de características de suma importância ao mapeamento geomorfológico. A partir desse dado, é possível empregar a visão estereoscópica no processo de interpretação, restituir vetores e extrair MDE. Há ainda a possibilidade de se avaliar a qualidade planimétrica do MDE, por meio das orto-imagens do subsistema VNIR.
- b) Os resultados da acurácia altimétrica apontam que o MDE ASTER/Terra é adequado para mapeamento topográfico na escala de 1:100.000, ou inferior. Porém, os resultados obtidos da acurácia planimétrica indicaram a possibilidade de emprego desses dados em mapeamentos temáticos, como o geomorfológico, na escala de 1:50.000, ou inferior.
- c) O algoritmo de segmentação, empregado nesta pesquisa, opera sobre uma diversidade de tipos de dados (imagens espectrais, grades de elevação/MDEs, dados temáticos, dados vetoriais etc.), os quais podem ser combinados entre si. Aliado a isso, pode-se realizar segmentações em diversos níveis de resolução, manipular a contribuição das variáveis cor e forma e empregar procedimentos de agrupamento de objetos, de acordo com seus atributos ou conteúdo temático. Essa flexibilidade, possibilita a construção de diversas estratégias de segmentação, de acordo com os dados disponíveis e com a complexidade geomorfológica da área estudada. No caso específico desta pesquisa, realizou-se uma segmentação paulatina e eficaz das unidades de interesse, partindo-se das macro-unidades geomorfológicas até as 15 unidades geomorfológicas detalhadas.

- d) O método de interpretação aqui apresentado, baseado em análise orientada a objeto, demonstrou a viabilidade de se conduzir uma classificação supervisionada (ou semi-automática) de unidades geomorfológicas com um nível de detalhamento elevado, compreendendo um total de 15 classes. A realização desse procedimento não seria possível nas plataformas convencionais de processamento digital de imagens, as quais operam, na sua grande maioria, apenas com informações estatísticas das regiões (média, variância e, eventualmente, métricas texturais) e exclusivamente com um único nível de segmentação.
- e) No que diz respeito ao desempenho do sistema de interpretação em termos de velocidade de execução, convém mencionar que boa parcela do tempo empregada na construção da rede consistiu na escolha dos atributos e na definição das respectivas funções *fuzzy* associadas a cada um deles. Esses procedimentos ainda são realizados de forma heurística e se encontram, portanto, condicionados à subjetividade do intérprete. Uma vez que a rede é finalizada, a classificação é executada em poucos segundos. Convém lembrar que alguns ajustes manuais feitos na segmentação não excederam a duas horas de trabalho e foram devidos, no caso particular desta pesquisa, à complexidade geomorfológica da área de estudo, bem como a limitações dos dados de entrada, que nem sempre puderam fornecer insumos para a correta delimitação de fronteiras em algumas unidades.
- f) A justificativa em prol do uso desses sistemas reside na versatilidade exploratória dos dados de entrada, o que permite ao intérprete um entendimento mais profundo do objeto de estudo, em vista da consideração de uma gama diversificada de atributos. Um outro argumento a favor do emprego desses sistemas consiste no caráter replicável da rede de classificação para outras áreas de estudo, não necessariamente com as mesmas dimensões, mas com configurações morfológicas semelhantes, uma vez que o sistema permite o ajuste das funções e seus limiares, a fim de garantir a conformidade da rede à

realidade em análise, economizando assim esforços de modelagem por parte do intérprete e tempo de processamento computacional.

- g) Com relação à eficácia do sistema utilizado, isto pôde ser avaliado pelos resultados da validação, no que diz respeito à qualidade da classificação. No nível mais grosseiro de classificação, contendo somente quatro classes de unidades geomorfológicas, o índice Kappa foi de 88,96%, e no nível fino, contendo **15 classes**, o valor obtido para o índice foi de 66,41%.
- h) Uma vez que o grande desafio para o aumento da eficácia desses sistemas se refere à diminuição do tempo para seleção de atributos e determinação de suas respectivas funções *fuzzy* (em termos de formato e limiares), deve-se visar a exploração de rotinas e métodos que otimizem essas tarefas. Com destaque para o emprego de algoritmos de redes neurais, na seleção de atributos e, também, para a utilização de sistemas neuro-*fuzzy* na definição automática das funções de pertinência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMS, M.; HOOK, S.; RAMACHANDRAN, B. **ASTER user handbook (Version 2)**. [S.l]: Jet Propulsion Laboratory – EROS Data Center, 2007.

Disponível em:

<http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_user_guide_v2.pdf>

. Acesso em: 01/Fev/2007.

ALMEIDA, F. F. M. The origin and evolution of the South American Platform. **Earth-Science Reviews**, n. 70, p. 77 - 111, 2000.

ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 2, p. 135 - 150, 1998.

ASSELEN, S.; SEIJMONSBERGEN, A. C. Expert-driven semi-automated geomorphological mapping for a mountainous area using a laser DTM. **Geomorphology**, v. 78, n. 3-4, p. 309-320, 2006.

BENZ, U. C.; HOFMANN, P.; WILLHAUCK, G.; LINGENFELDER, I.; HEYNEN, M. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information. **Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 58, n. 3-4, p. 239-258, 2004.

BIAN, L. Object-oriented representation of environmental phenomena: Is everything best represented as an object? **Annals of the Association of American Geographers**, v. 97, n. 2, p. 267-281, 2007.

BINS, L. S.; FONSECA, L. M. G.; ERTHAL, G. J.; IL, F. M. Satellite imagery segmentation: a region growing approach. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., Salvador, **Anais...** São José dos Campos: INPE, 1996, p. 677 - 680. CD-ROM. ISBN 85-17-00014-5. (INPE-6231-PRE/2321).
Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/02.05.09.30>>. Acesso em: 20 janeiro 2008.

BITTENCOURT, G. **Inteligência artificial: ferramentas e teorias**. Florianópolis/SC: Editora da UFSC, 2006. 371 p.

BOHAM-CARTER, G. F. Tools for map analysis: multiple maps. In: _____ (Ed.). **Geographic Information Systems for geoscientists: modelling with GIS**. Kidlington: Pergamon, 1994.

BRASIL. Decreto n. 89.817, de 20 de junho de 1984: Dispõe sobre as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**. 22 de Junho de 1984.

BURACZYNSKI, J. Polish geomorphological maps. **Zeitschrift für Geomorphologie**, n. 80, p. 25 - 30, Dec., 1990.

BURNETT, C.; BLASCHKE, T. A multi-scale segmentation/object relationship modelling methodology for landscape analysis. **Ecological Modelling**, v. 168, n. 3, p. 233-249, 2003.

BUYUKSALIH, G.; JACOBSEN, K. Comparison of DEM generation by very high resolution optical satellites. In: **EARSel**, 26., 2007, Warsaw, Poland. **Proceedings...** p. 627 – 637.

CAMARGO, F. F.; OLIVEIRA, C. G.; FLORENZANO, T. G.; ALMEIDA, C. M. Avaliação da acurácia posicional da base cartográfica do município de São José dos Campos (SP) por análises de tendência e precisão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA - I CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 23., Rio de Janeiro/RJ, Brasil. **Anais...** 2007. p. 775 – 780.

CLAUSI, D. A. An analysis of co-occurrence texture statistics as a function of grey level quantization. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 28, n. 1, p. 45-62, 2002.

COLTRINARI, L. **Evolução geomorfológica do planalto de São José dos Campos (SP)**. 114 p. Tese de Livre-docência (Universidade de São Paulo - USP), São Paulo, 2003.

CONGALTON, R. G. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. **Remote Sensing of Environment**, n. 37, p. 35 - 46, 1991.

CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. Boca Raton: Lewis Publishers, 1999. 137 p.

DEFINIENS. **Definiens professional 5**: reference book. Munich: Definiens (The Imaging Intelligence Company), 2006. 122 p.

DEMEK, J. (Ed.). **Manual of detailed geomorphological mapping**. Praga: Academy os Sciences, 1972.

DNPM. **Folhas SF 23/24 (Rio de Janeiro/Vitória)**: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro/RJ: DNPM, 1983.

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

DURKIN, J. Expert systems: A view of the field. **IEEE Expert-Intelligent Systems & Their Applications**, v. 11, n. 2, p. 56-63, 1996.

EHLERS, M.; WELCH, R. Stereocorrelation of Landsat TM images. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 53, n. 09, p. 1231 - 1237, 1987.

EMBLETON, C.; VERSTAPPEN, H. T. The nature and objectives of applied geomorphological mapping. **Zeitschrift für Geomorphologie**, n. 68, p. 1 - 8, Jul. 1988.

FLORENZANO, T. G. **Unidades geomorfológicas da região sudeste (SP) identificadas por imagens de satélite**. Doutorado (FFLCH-USP), São Paulo/SP, 1993.

_____. **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FLORENZANO, T. G.; CSORDAS, S. M. **Mapa geomorfológico da Região do Vale do Paraíba e Litoral Norte do Estado de São Paulo**. São José dos Campos/SP: INPE, 1993.

FLORINSKY, I. V. Artificial lineaments in digital terrain modelling: can operators of topographic variables cause them? **Mathematical Geology**, v. 37, n. 4, p. 357-372, 2005.

FREITAS, C. C. **Validação de classificação multinível com propagação de erro.** (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - São José dos Campos). São José dos Campos, 2007. Comunicação Pessoal.

GALO, M.; CAMARGO, P. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: **Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário - COBRAC**, 1., 1994, Florianópolis/SC, Brasil. **Anais...** p. 41-48.

GESCH, D. B. The National Elevation Dataset. In: MAUNE, D. F. (Ed.). **Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual.** Bethesda, Maryland: ASPRS, 2007.

GUSTAVSSON, M. **Development of a detailed geomorphological mapping system and GIS geodatabase in Sweden.** 36 p. Dissertation (Uppsala Universitet), Sweden, 2006. Disponível em: <http://publications.uu.se/theses/abstract.xsql?dbid=7222>.

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**, v. 77, n. 1-2, p. 90-111, 2006.

HALL, D. L.; LLINAS, J. An introduction to multisensor data fusion. **IEEE**, v. 85, 1., 1997, **Proceedings...** p. 6-23.

HAY, G. J.; BLASCHKE, T.; MARCEAU, D. J.; BOUCHARD, A. A comparison of three image-object methods for the multiscale analysis of landscape structure. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 57, n. 5-6, p. 327-345, 2003.

HAYDEN, R. S. Geomorphological mapping. In: SHORT, N. M.; BLAIR, Jr., R W. (Ed.). **Geomorphology from space: a global overview of regional landforms.** Washington, DC: NASA, 1986.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). **Folha São José dos Campos/SP.** Rio de Janeiro/RJ: IBGE, escala: 1:50.000, 1973.

IGARASHI, T. ALOS mission requirement and sensor specifications. **Advances in Space Research**, v. 28, n. 1, p. 127-131, 2001.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING)**. São José dos Campos/SP: INPE, 2006.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). **CBERS 2B - crab angle evaluation**. São José dos Campos/SP: INPE, 2007.

Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). **Mapa geológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, escala 1:500.000, 1981a.

_____. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, escala 1:1000.000, 1981b.

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

_____. On constructing detailed geomorphological maps. **Zeitschrift für Geomorphologie**, n. 4, p. 457 - 470, Dec., 1988.

KURKDJIAN, M. L. N. O.; VALÉRIO FILHO, M.; VENEZIANI, P.; PEREIRA, M. N.; FLORENZANO, T. G.; ANJOS, C. E.; OHARA, T.; DONZELI, P. L.; ABDON, M. M.; SAUSEN, T. M.; PINTO, S. A. F.; BERTOLDO, M. A.; BLANCO, J. G.; CZORDAS, S. M. **Macrozoneamento da região do Vale do Paraíba e litoral norte do Estado de São Paulo**. São José dos Campos/SP: INPE, 1992. 176 p.

LANDIS, J.; KOCH, G. The measurement of observer agreement for categorical data. **Biometrics**, v. 33, p. 159 - 174, 1977.

LINDER, W. **Digital photogrammetry: a practical course**. 2. ed., Springer-Verlag, 2006. 214 p.

McBRATNEY, A. B.; ODEH, I. O. A. Application of fuzzy sets in soil science: fuzzy logic, fuzzy measurements and fuzzy decisions. **Geoderma**, v. 77, n. 2-4, p. 85-113, 1997.

MEINEL, G.; NEUBERT, M. A comparison of segmentation programs for high resolution remote sensing data. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 23, n. Part B, p. 1097 – 1105, 2004.

MERCHANT, D. C. Spatial accuracy standards for large scale line maps. In: **Technical papers of the 42nd american congress on surveying and mapping**, 42., 1982, Denver/CO, USA. **Proceedings...** p. 222 - 231.

MILIARESIS, G. C. Geomorphometric mapping of Zagros Ranges at regional scale. **Computers & Geosciences**, v. 27, n. 7, p. 775-786, 2001.

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

____. Quantitative representation of mountain objects extracted from the global digital elevation model (GTOPO30). **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 5, p. 949-964, 2002.

MOORE, A. B.; MORRIS, K. P.; BLACKWELL, G. K.; JONES, A. R.; SIMS, P. C. Using geomorphological rules to classify photogrammetrically-derived digital elevation models. **International Journal of Remote Sensing**, v. 24, n. 13, p. 2613-2626, 2003.

MOORE, T. Geospatial expert systems. In: OPENSHAW, S.; ABRAHART, R. J. (Ed.). **Geocomputation**. London: Taylor & Francis, 2000.

MUÑOZ, X.; FREIXENET, J.; CUFI, X.; MARTI, J. Strategies for image segmentation combining region and boundary information. **Pattern Recognition Letters**, v. 24, n. 1-3, p. 375-392, 2003.

OLIVEIRA, J. B. **Solos do Estado de São Paulo**: descrição das classes registradas no mapa pedológico. Campinas/SP: IAC, 1999. 112 p.

OLIVEIRA, J. B.; CAMARGO, M. N.; ROSSI, M.; FILHO, B. C. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**. Campinas/SP:IAC/EMBRAPA-Solos, 1999.

OPENSHAW, S. **The modifiable areal unit problem**. Norwich: Geo Books, 1984.

PCI. **Geomatica orthoEngine v. 9.0 user guide**. Ontário, Canada: Richmond Hill, 2003.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 6, p. 17 - 29, 1992.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: HUMANITAS/IPT/FAPESP, 1997.

RUMBAUGH, J.; BLAHA, M.; PREMERLANI, W.; EDDY, F.; LORENSEN, W. **Modelagem e projetos baseados em objetos**. Rio de Janeiro/RJ: Campus, 1994.

RUSS, J. C. **The image processing handbook**. Boca Raton, Florida: CRC Press, 1998. 984 p.

SANDAU, R. Potential and shortcoming of small satellite for topographic mapping. In: **International Workshop on Earth Observation Small Satellites for Remote Sensing Applications**, 1., 2007, Kuala-Lumpur, Malásia. **Proceedings...**

Disponível em:

http://www.isprs.org/commission1/ankara06/makaleler/Sandau_Small_Satellite.pdf

Acesso em: 15/Nov/2007.

SCHIEWE, J.; TUFTE, L.; EHLERS, M. Potential and problems of multi-scale segmentation methods in remote sensing. **GIS - Zeitschrift für Geoinformationssysteme**, n. 6, p. 34 - 39

SHARY, P. A. **Local morphometric variables**. In: Peter Shary's Personal Website.

Disponível em:

<http://www.giseco.info/pb/wp_d4052550/wp_d4052550.html?0.7718744701805855>

Acesso em: 17/Mar/2008.

SHARY, P. A.; SHARAYA, L. S.; MITUSOV, A. V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. **Geoderma**, v. 107, n. 1-2, p. 1-32, 2002.

SOUSA, C. J. S. **Carta de vulnerabilidade à erosão como subsídio ao zoneamento ecológico-econômico em área intensamente antropizada**. 1998 - 12. 172 p. (INPE-7030-TDI/662). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1998. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/deise/1999/04.27.16.03>>. Acesso em: 25 maio 2008.

SOUZA FILHO, C. R. ASTER à vista. **Revista InfoGeo**, p. 62 - 64, 2003.

STEELE, B. M.; WINNE, J. C.; REDMOND, R. L. Estimation and mapping of misclassification probabilities for thematic land cover maps. **Remote Sensing of Environment**, v. 66, n. 2, p. 192-202, 1998.

TOUTIN, T. Elevation modelling from satellite visible and infrared (VIR) data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 22, n. 06, p. 1097 – 1125, 2001.

_____. Three-dimensional topographic mapping with ASTER stereo data in rugged topography. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 10, p. 2241-2247, 2002.

_____. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 10, p. 1893-1924, 2004.

_____. Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: SPOT-5, EROS-A, IKONOS-II, and QuickBird. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 10, p. 2121-2129, 2004.

_____. Generation of DSMs from SPOT-5 in-track HRS and across-track HRG stereo data using spatiotriangulation and autocalibration. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 60, n. 3, p. 170-181, 2006.

_____. Spatiotriangulation with multisensor HR stereo-images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 44, n. 2, p. 456-462, 2006.

TROPMAIR, H. Estudo comparativo de mapeamentos geomorfológicos. **Notícia Geomorfológica**, v. 2, n. 10, p. 3 - 11, 1970.

VALERIANO, M. M. Curvatura vertical de vertentes em microbacias pela análise de modelos digitais de elevação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 7, n. 3, p. 539 - 546, 2003.

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

VERDADE, F. C.; HUNGRIA, L. S. Estudo genético de bacia orgânica do Vale do Paraíba. **Bragantia**, v. 25, n. 16, p. 189 - 202, 1966.

VERSTAPPEN, H. T. **Applied Geomorphology**: geomorphological surveys for environmental development. Amsterdam - Oxford - New York: Elsevier, 1983.

VERSTAPPEN, H. T.; ZUIDAM, R. A. Van. **The ITC system of geomorphologic survey**: a basis for the evaluation of natural resources and hazards. Enschede, Netherlands: ITC, 1991. 89 p.

WELCH, R.; JORDAN, T.; LANG, H.; MURAKAMI, H. ASTER as a source for topographic data in the late 1990's. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1282-1289, 1998.

WITLOX, F. Expert systems in land-use planning: An overview. **Expert Systems with Applications**, v. 29, n. 2, p. 437-445, 2005.

ZADEH, L. A. Fuzzy sets. In: KLIR, G. J.; YUAN, B. (Org.). **Advances in fuzzy systems - applications and theory**: "fuzzy sets, fuzzy logic and fuzzy systems". v. 6. Binghamton: World Scientific, 1996a, p. 19 - 34.

_____. Fuzzy sets and systems. In: KLIR, G. J.; YUAN, B. (Org.). **Advances in fuzzy systems - applications and theory**: "fuzzy sets, fuzzy logic and fuzzy systems". v. 6. Binghamton: World Scientific, 1996b, p. 35 - 37.

ZUIDAM, R. A. Van. **Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping**. Enschede: Smits Publishers, 1986. 449 p.

APÊNDICE A – Discrepâncias planimétricas

ID	ΔE	ΔN	Resultante
1	-6.975	4.555	8.330
2	8.904	1.935	9.112
3	-19.881	-9.908	22.213
4	-25.714	-4.879	26.173
5	-19.621	17.186	26.083
6	3.073	15.027	15.338
7	-22.859	7.609	24.092
8	-12.857	18.556	22.575
9	-4.590	20.166	20.681
10	12.756	35.246	37.483
11	-29.447	-16.694	33.850
12	-20.101	10.306	22.589
13	-53.626	-4.127	53.785
14	23.540	24.125	33.707
15	22.023	-1.892	22.105
16	14.923	2.235	15.089
17	12.481	13.300	18.239
18	26.699	4.978	27.159
19	-8.088	5.189	9.610
20	17.591	12.837	21.777
21	16.328	5.253	17.152
22	-0.556	24.062	24.068
23	-0.158	10.963	10.964
24	4.877	17.281	17.956
25	12.597	4.538	13.390
26	13.173	1.985	13.322
27	10.574	13.056	16.801
28	6.899	13.334	15.013

APÊNDICE B – Discrepâncias altimétricas

ID	ΔH
1	9.566
2	18.409
3	12.098
4	20.432
5	11.385
6	9.389
7	10.996
8	5.758
9	12.893
10	3.506
11	0.883
12	-0.071
13	-1.771
14	4.238
15	14.040
16	13.330
17	18.180
18	4.699
19	-0.299
20	5.180
21	1.222
22	-3.867
23	7.042
24	17.137
25	21.212
26	10.490
27	15.638
28	-3.417
29	-3.130
30	-18.388
31	-3.042
32	6.611
33	13.747
34	-5.142
35	-12.695
36	-8.385
37	-0.954
38	13.199
39	11.418
40	15.557
41	17.404
42	29.118
43	11.918
44	24.067
45	4.847

(Continua)

ID	ΔH
46	-7.804
47	1.592
48	-4.930
49	-1.467
50	1.307
51	6.230
52	-0.596
53	30.578
54	-3.995
55	0.350
56	-2.705
57	0.419
58	-5.260
59	-3.989
60	-2.959
61	3.197
62	4.673
63	-1.922
64	-6.293
65	3.370
66	-2.316
67	-0.034
68	0.797
69	9.045
70	5.880
71	6.850
72	-4.602
73	-2.818
74	0.371
75	6.108
76	1.282
77	-1.877
78	-8.229
79	1.586
80	7.783
81	3.174
82	5.587
83	5.848
84	5.617
85	4.368
86	2.435
87	-3.041
88	2.731
89	4.245
90	3.024
91	6.247
92	4.228
93	6.007
94	0.244
95	-2.921

(Continua)

Apêndice B - Conclusão

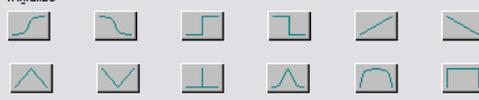
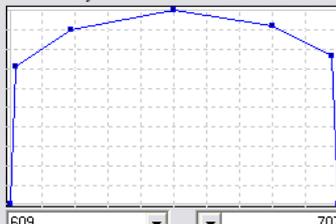
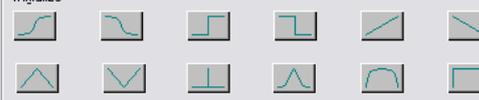
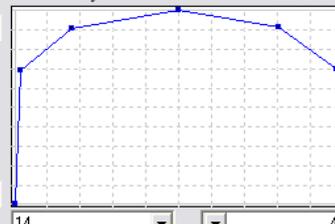
ID	ΔH
96	-1.642
97	-4.445
98	-3.046
99	1.077
100	23.282
101	7.364
102	7.220
103	-3.763
104	-1.396
105	-4.835
106	8.042
107	3.154
108	4.060
109	4.575

APÊNDICE C – Algoritmo para o cálculo da acurácia vertical relativa

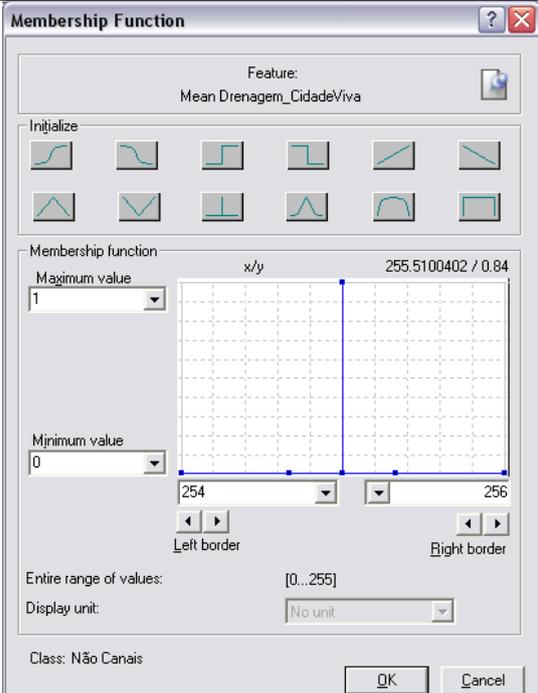
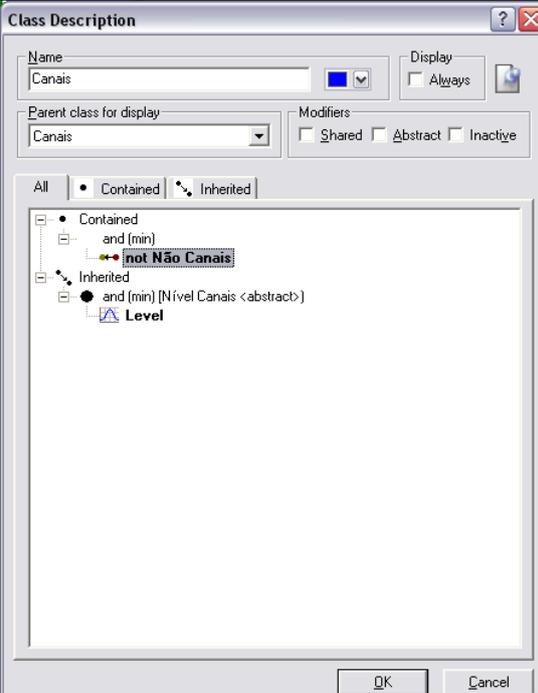
```
#Limpa o ambiente de compilação para iniciar a rotina.
clear all;
close all;
#Abre o arquivo de texto com os valores de cotas altimétricas da referência e do MDE.
x=load('VALIDA.TXT');
#Realiza as combinações de pares únicos.
pos=nchoosek(1:109,2);
#Calcula as diferenças na referência.
diffcol1=x(pos(:,1),1)-x(pos(:,2),1);
#Calcula as diferenças no MDE..
diffcol2=x(pos(:,1),2)-x(pos(:,2),2);
#Calcula as diferenças entre as diferenças (referência e MDE). Todas as diferenças são
em módulo.
delta=((abs(abs(diffcol1)-abs(diffcol2))));
```

APÊNDICE D – Funções *fuzzy* utilizadas na classificação dos corpos d'água

Atributos:

Média da altimetria	Média dos ND's da banda 3N
<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"><p style="text-align: center;">Membership Function ? X</p><p style="text-align: center;">Feature: Mean DEM 📄</p><p>Initialize</p><div style="display: flex; justify-content: space-around;"></div><p>Membership function</p><p>Maximum value: 1</p><p>Minimum value: 0</p><p style="text-align: center;">x/y 681.811245 / 0.96</p><p style="text-align: center;">609 707</p><p style="text-align: center;">Left border Right border</p><p>Entire range of values: [-32768...32767]</p><p>Display unit: No unit</p><p>Class: Corpos d'água</p><p style="text-align: right;"><input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/></p></div>	<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"><p style="text-align: center;">Membership Function ? X</p><p style="text-align: center;">Feature: Mean VNIR3 📄</p><p>Initialize</p><div style="display: flex; justify-content: space-around;"></div><p>Membership function</p><p>Maximum value: 1</p><p>Minimum value: 0</p><p style="text-align: center;">x/y Coordinates</p><p style="text-align: center;">14 46</p><p style="text-align: center;">Left border Right border</p><p>Entire range of values: [-32768...32767]</p><p>Display unit: No unit</p><p>Class: Corpos d'água</p><p style="text-align: right;"><input type="button" value="OK"/> <input type="button" value="Cancel"/></p></div>

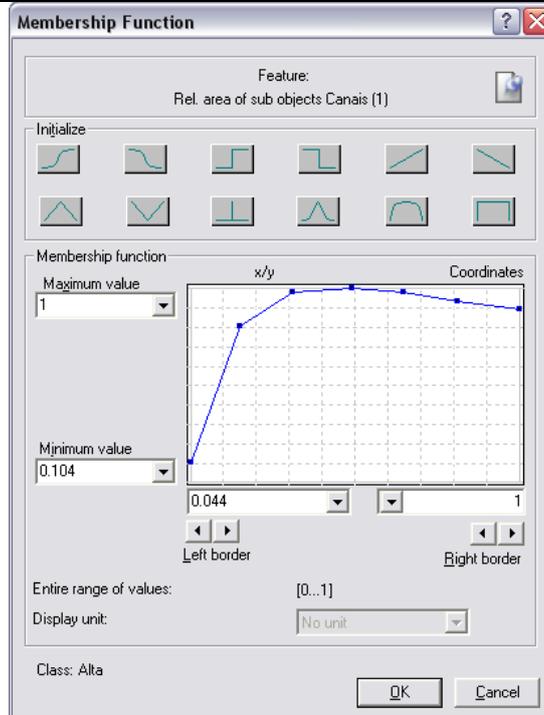
APÊNDICE E – Funções *fuzzy* utilizadas na classificação da densidade de drenagem

Classificação dos canais de drenagem	
Atributos:	
Média dos ND's da imagem temática	O complementar à curva anterior
 <p>Membership Function</p> <p>Feature: Mean Drenagem_CidadeViva</p> <p>Initialize</p> <p>Membership function</p> <p>Maximum value: 1</p> <p>Minimum value: 0</p> <p>x/y: 255.5100402 / 0.84</p> <p>Left border: 254</p> <p>Right border: 256</p> <p>Entire range of values: [0..255]</p> <p>Display unit: No unit</p> <p>Class: Não Canais</p> <p>OK Cancel</p>	 <p>Class Description</p> <p>Name: Canais</p> <p>Parent class for display: Canais</p> <p>Modifiers: <input type="checkbox"/> Shared <input type="checkbox"/> Abstract <input type="checkbox"/> Inactive</p> <p>All: <input checked="" type="radio"/> Contained <input type="radio"/> Inherited</p> <ul style="list-style-type: none">Contained<ul style="list-style-type: none">and (min)not Não CanaisInherited<ul style="list-style-type: none">and (min) [Nível Canais <abstract>]Level <p>OK Cancel</p>

Classificação da densidade de drenagem

Classe Alta:

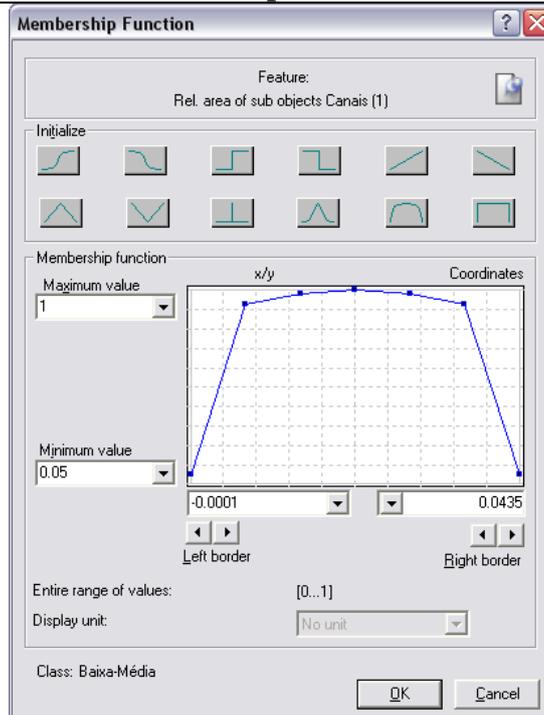
Atributo: Área relativa dos canais por célula de densidade de drenagem



Classificação da densidade de drenagem

Classe Baixa-média:

Atributo: Área relativa dos canais por célula de densidade de drenagem



Classificação da densidade de drenagem

Subclasses de Baixa-média: Baixa Média (real)

Atributo: Borda relativa à classe “Alta densidade de drenagem”

The screenshot shows the 'Membership Function' dialog box. At the top, it says 'Feature: Rel. border to Alta'. Below that is an 'Initialize' section with several icons representing different membership functions. The 'Membership function' section has a 'Maximum value' dropdown set to '1' and a 'Minimum value' dropdown set to '0'. A graph shows a blue curve starting at (0.15, 1) and ending at (0.9, 0). The x-axis is labeled 'x/y' and has '0.15' and '0.9' marked. The y-axis has '0' and '1' marked. Below the graph are 'Left border' and 'Right border' controls. At the bottom, it says 'Entire range of values: [0...1]' and 'Display unit: No unit'. The class is 'Baixa-Média Real'.

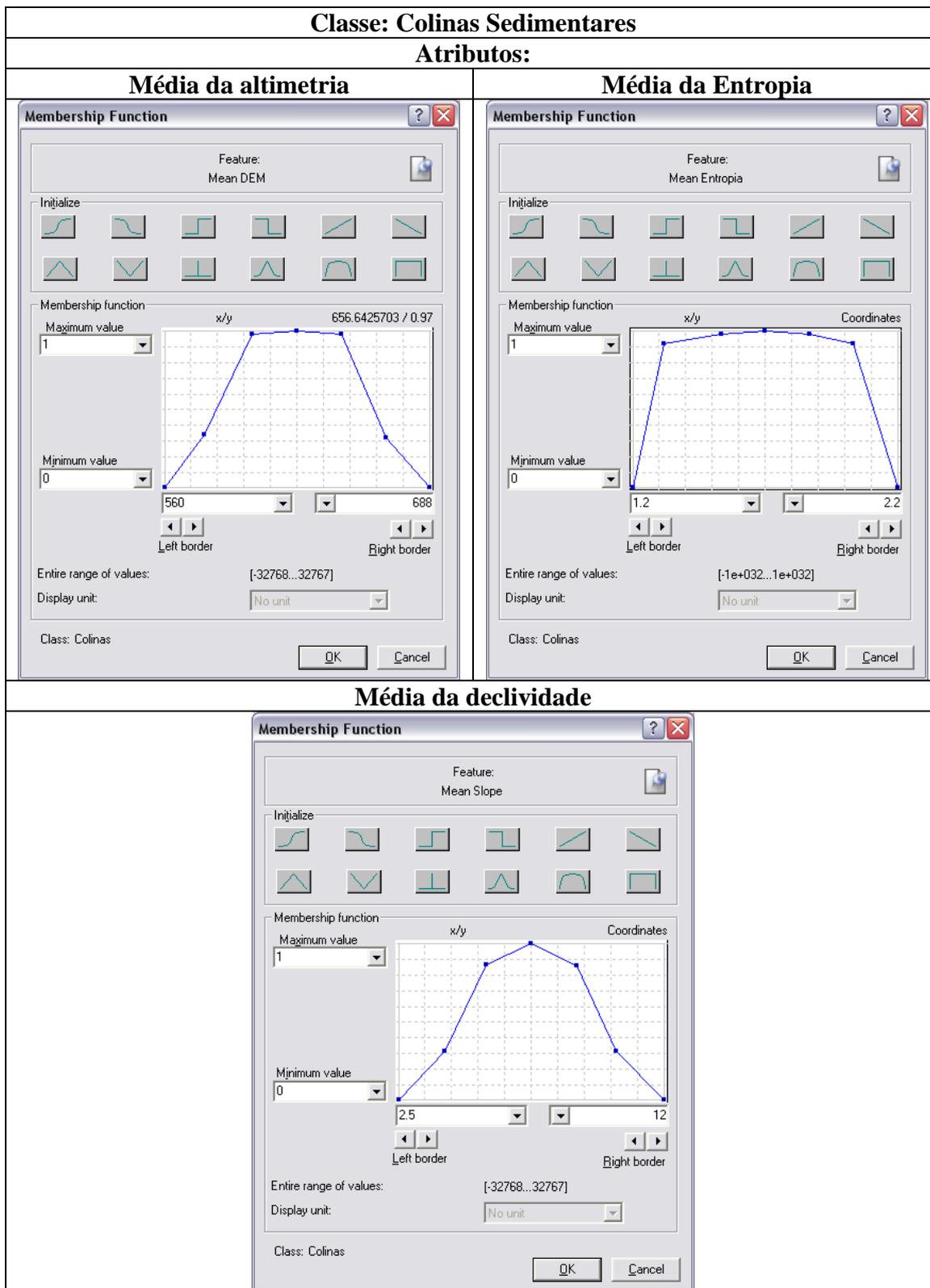
Classificação da densidade de drenagem

Subclasses de Baixa-média: Erros de comissão relativos à classe “Alta densidade de drenagem”:

Atributo: Borda relativa à classe “Alta densidade de drenagem”

The screenshot shows the 'Membership Function' dialog box. At the top, it says 'Feature: Rel. border to Alta'. Below that is an 'Initialize' section with several icons representing different membership functions. The 'Membership function' section has a 'Maximum value' dropdown set to '1' and a 'Minimum value' dropdown set to '0'. A graph shows a blue curve starting at (0.15, 0) and ending at (0.9, 1). The x-axis is labeled 'x/y' and has '0.15' and '0.9' marked. The y-axis has '0' and '1' marked. Below the graph are 'Left border' and 'Right border' controls. At the bottom, it says 'Entire range of values: [0...1]' and 'Display unit: No unit'. The class is 'Erro de Baixa-Média'.

APÊNDICE F – Funções *fuzzy* utilizadas na classificação das macro-unidades geomorfológicas



Subclasses de Colinas Sedimentares:
Colinas Sedimentares (real):
Atributos:
Borda relativa à classe “Serras/Montanhas/Morros”
<p>The screenshot shows the 'Membership Function' dialog box for the feature 'Rel. border to Serras/Morros'. The 'Maximum value' is set to 0.25 and the 'Minimum value' is set to 0. The graph shows a decreasing curve from left to right. The 'Entire range of values' is [0..1] and the 'Display unit' is 'No unit'. The class is 'Colinas Real'.</p>

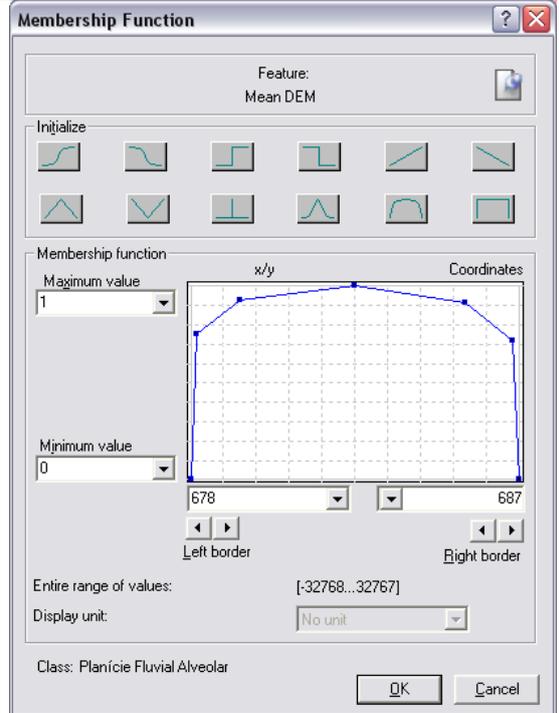
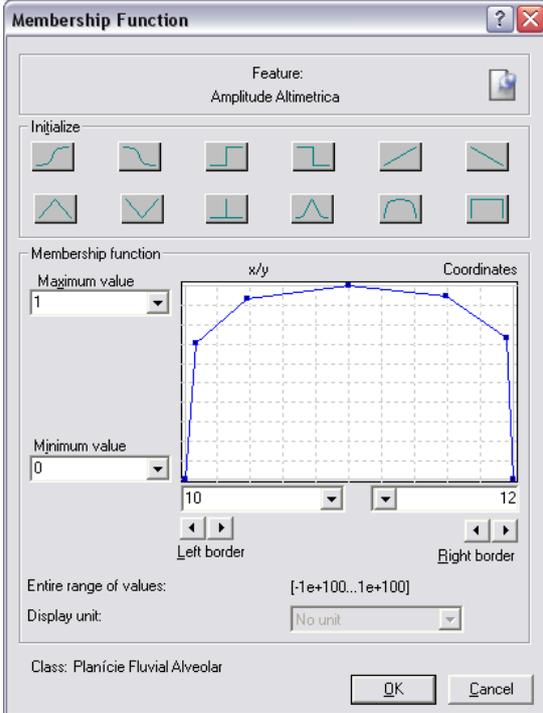
Subclasses de Colinas Sedimentares:
Erros de comissão relativos à classe “Serras/Montanhas/Morros”:
Atributos:
Borda relativa à classe “Serras/Montanhas/Morros”
<p>The screenshot shows the 'Membership Function' dialog box for the feature 'Rel. border to Serras/Morros'. The 'Maximum value' is set to 1 and the 'Minimum value' is set to 0. The graph shows an increasing curve from left to right. The 'Entire range of values' is [0..1] and the 'Display unit' is 'No unit'. The class is 'Erro de Colinas'.</p>

Classe: Alvéolo/Planícies intermontanas

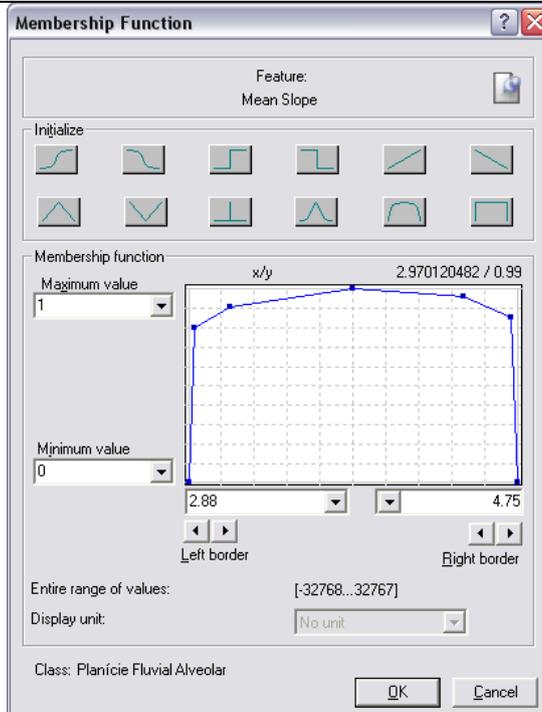
Atributos:

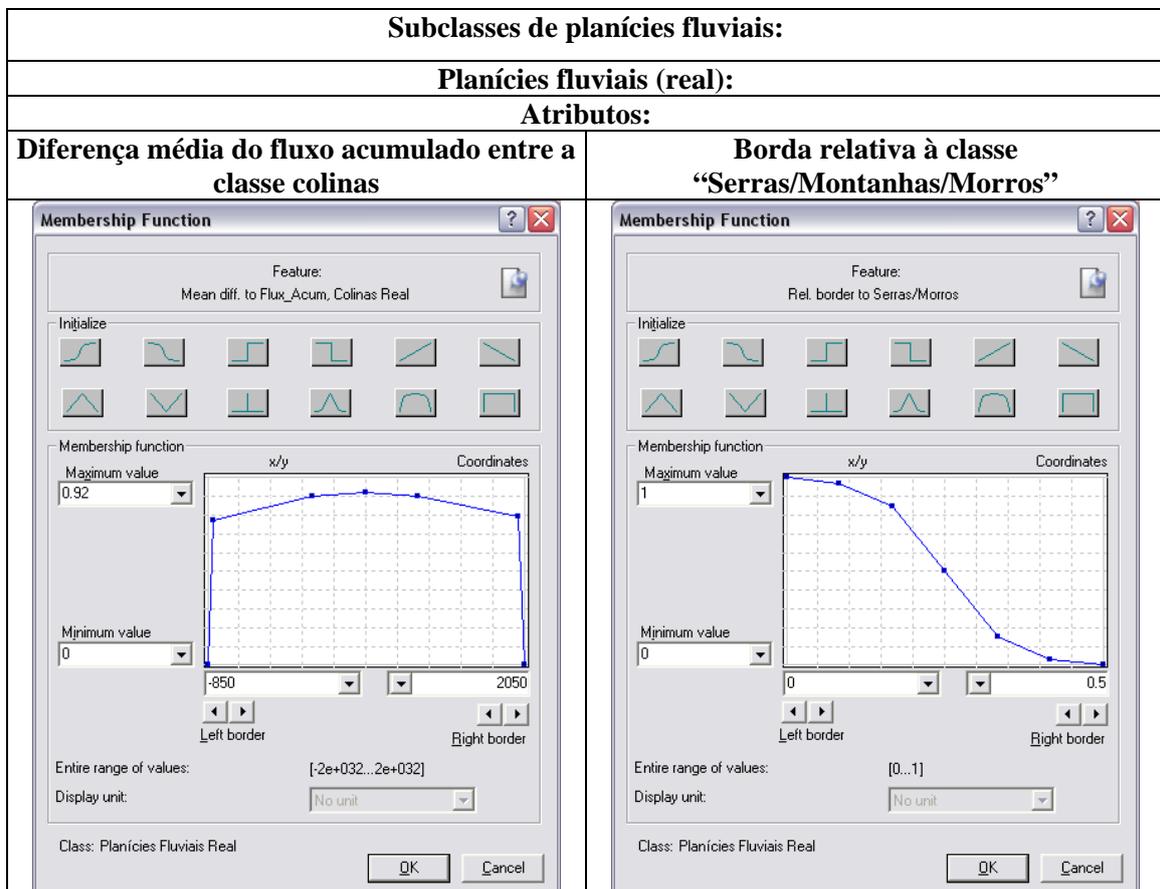
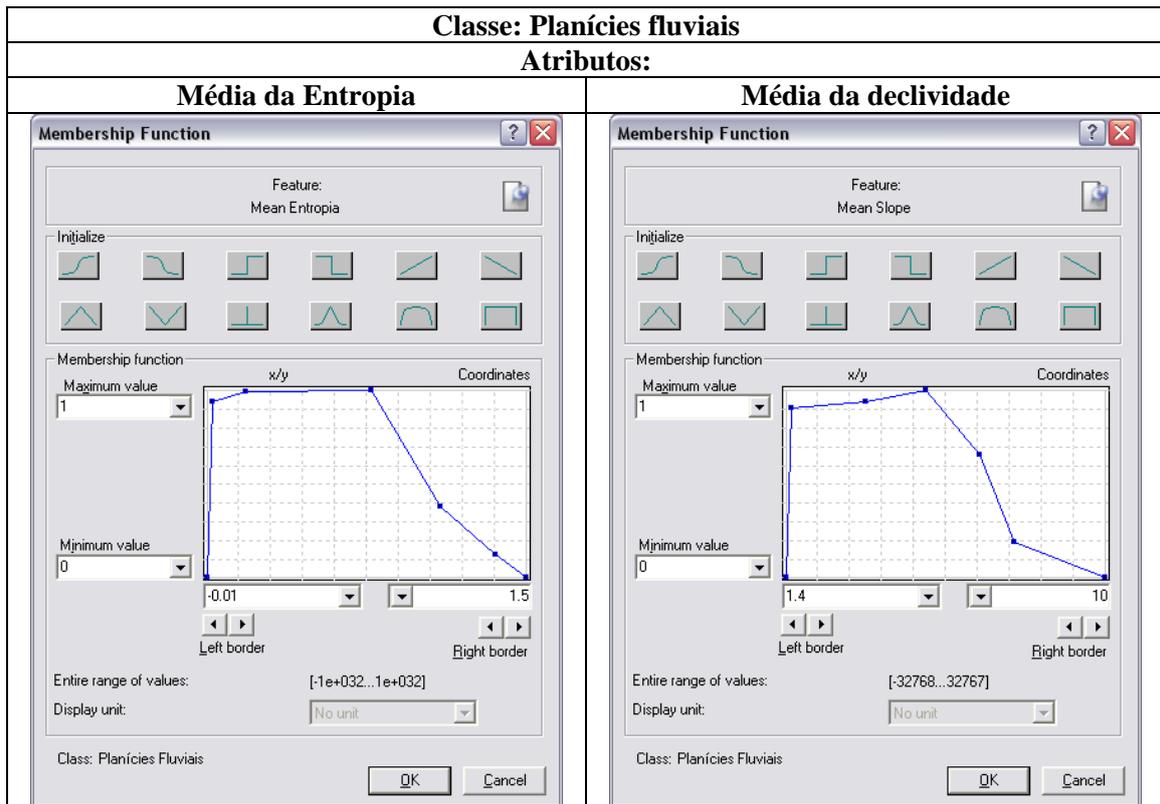
Amplitude altimétrica

Média da altimetria



Média da declividade





Subclasses de planícies fluviais:
Erros de comissão relativos à classe “Serras/Montanhas/Morros”:
Atributos:
Borda relativa à classe “Serras/Montanhas/Morros”

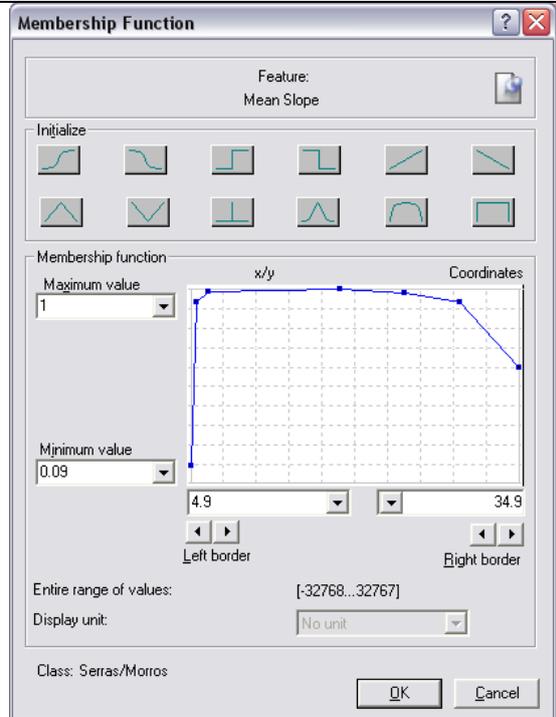
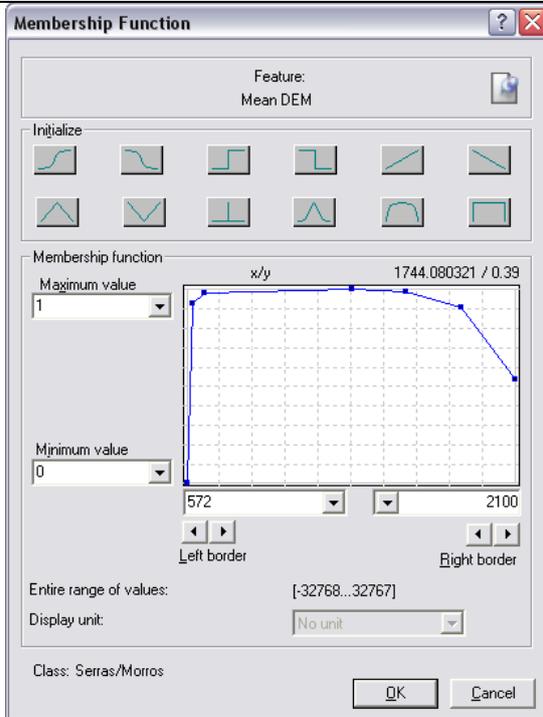
Subclasses de planícies fluviais:	
Erros de comissão relativos à classe “Colinas Sedimentares”:	
Atributos:	
Diferença média do fluxo acumulado entre a classe colinas	Variância da Curvatura Horizontal

Classe: Serras/Montanhas/Morros

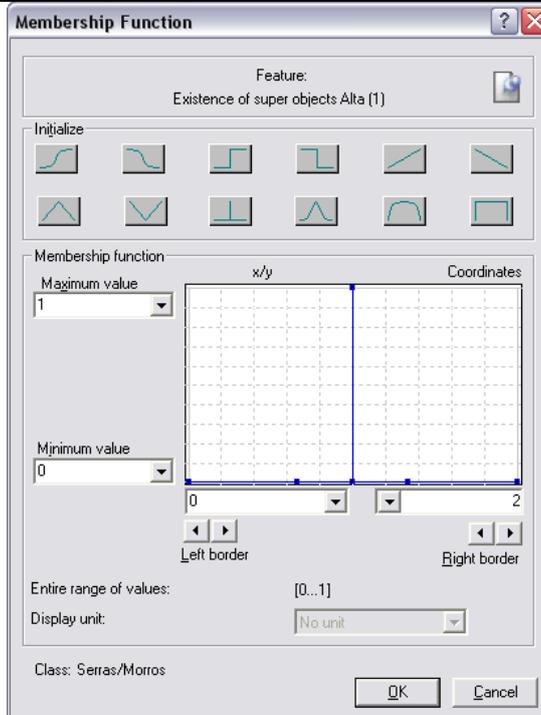
Atributos:

Média da altimetria

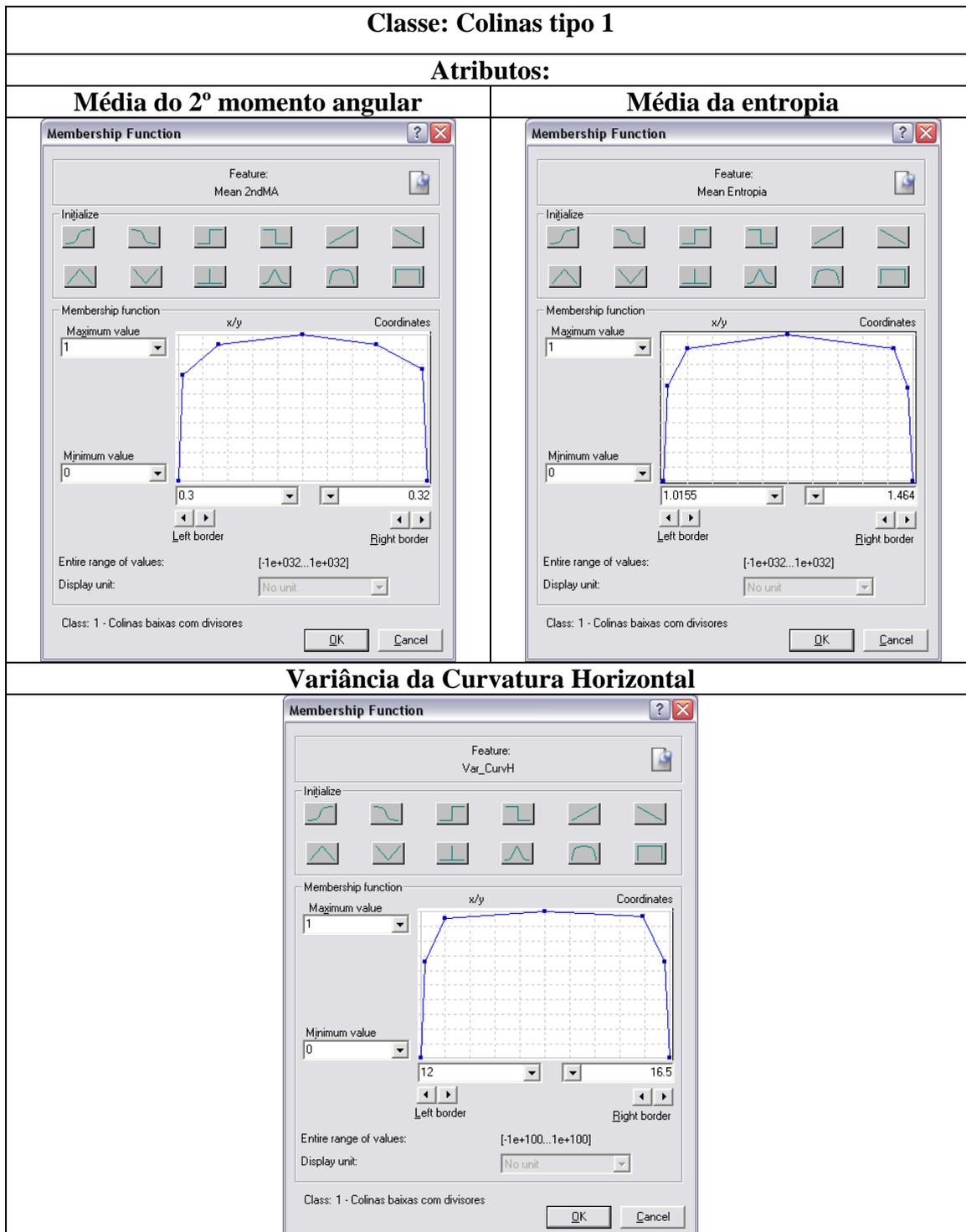
Média da declividade



Existência de superobjetos “Alta densidade de drenagem”



APÊNDICE G – Funções *fuzzy* utilizadas na classificação das unidades geomorfológicas detalhadas



Classe: Colinas tipo 2

Atributos:

Média da entropia

Variância da Curvatura Horizontal

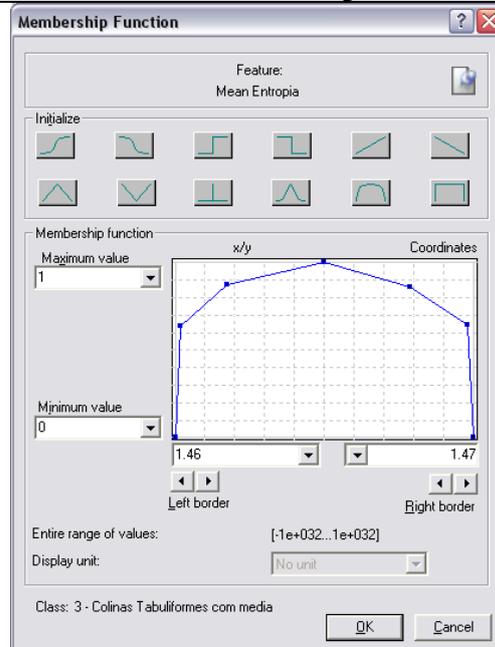
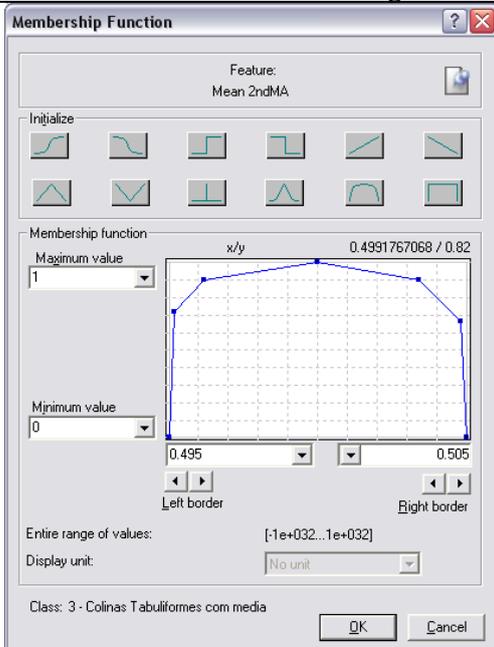
The image displays two side-by-side 'Membership Function' dialog boxes. The left dialog is for the feature 'Mean Entropia' and the right is for 'Var_CurvH'. Both dialogs show a grid with a blue bell-shaped curve representing the membership function. The left dialog has a maximum value of 1 and a range from 1.1 to 1.27. The right dialog has a maximum value of 0.317 and a range from 1.5 to 13.7. Both dialogs include a 'Minimum value' of 0, a 'Display unit' of 'No unit', and a 'Class' of '2 - Colinas com divisores subangulosos e'. The 'Entire range of values' for the left dialog is '[-1e+032...1e+032]' and for the right dialog is '[-1e+100...1e+100]'. Both dialogs have 'OK' and 'Cancel' buttons at the bottom.

Classe: Colinas tipo 3

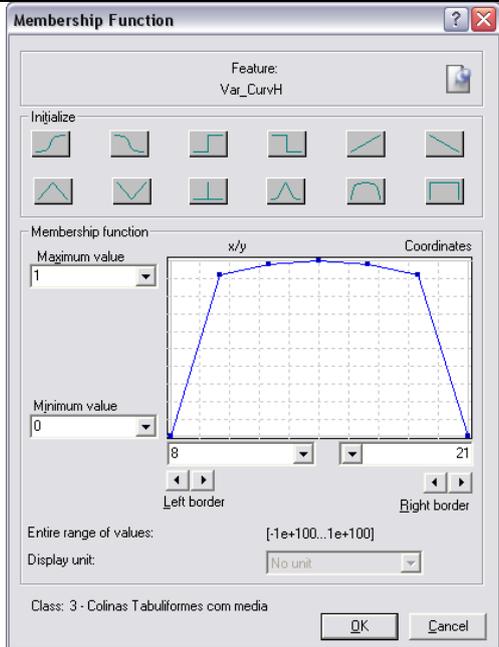
Atributos:

Média do 2º momento angular

Média da entropia



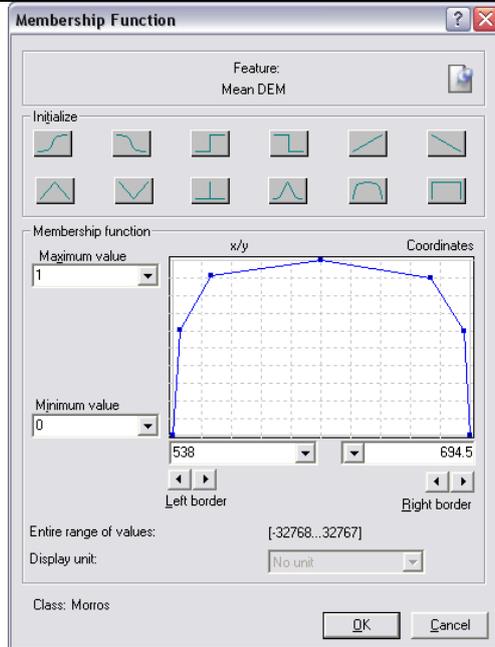
Variância da Curvatura Horizontal



Classe: Morros

Atributos:

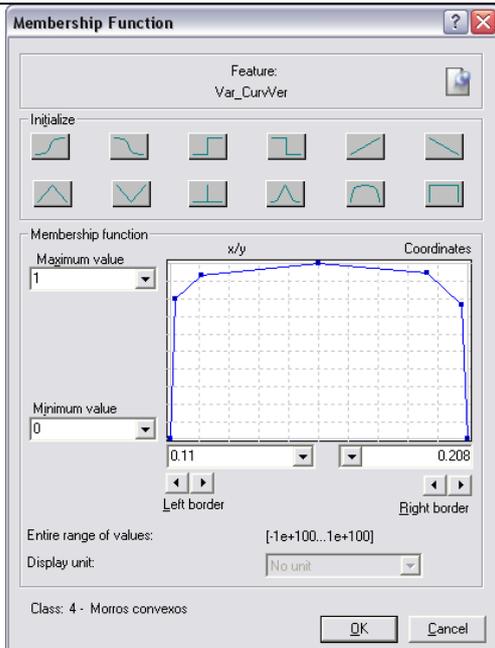
Média da altimetria



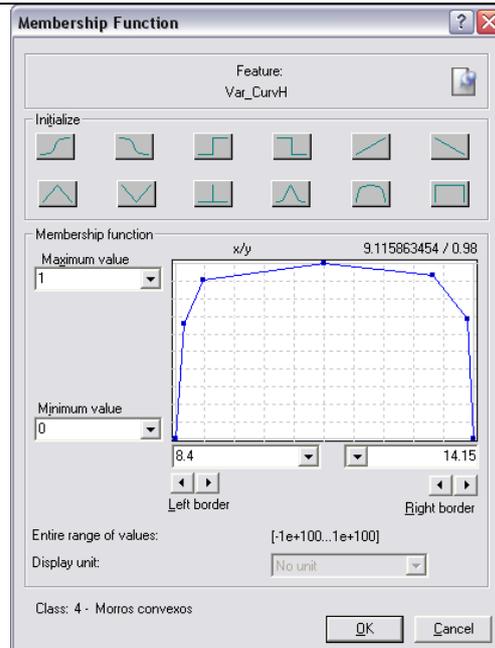
Subclasse: Morros tipo 1

Atributos:

Variância da curvatura vertical



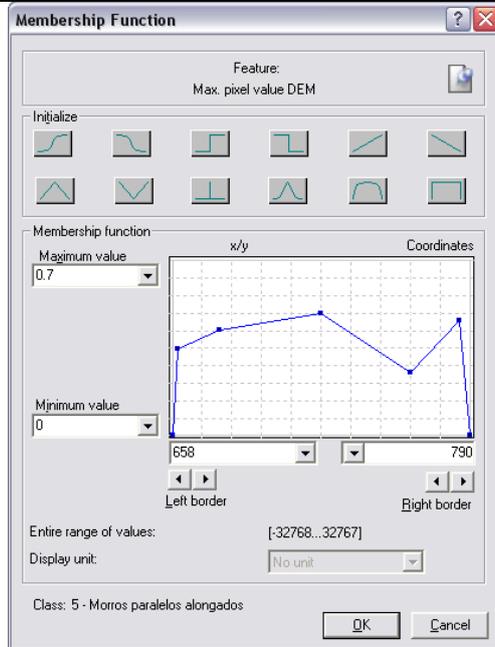
Variância da curvatura horizontal



Subclase: Morros tipo 2

Atributos:

Valores máximos de altimetria

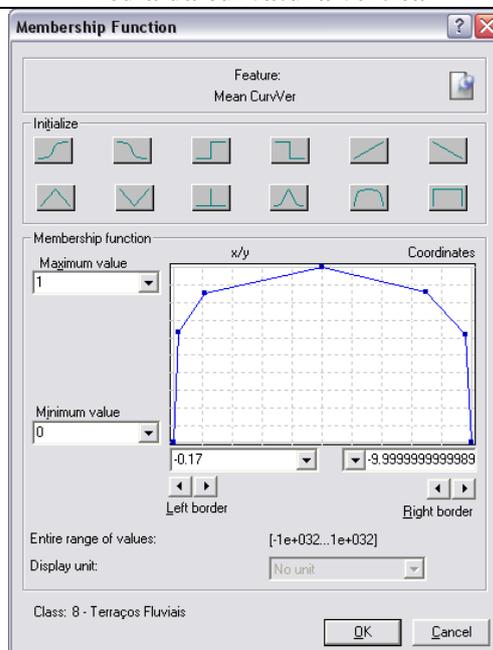
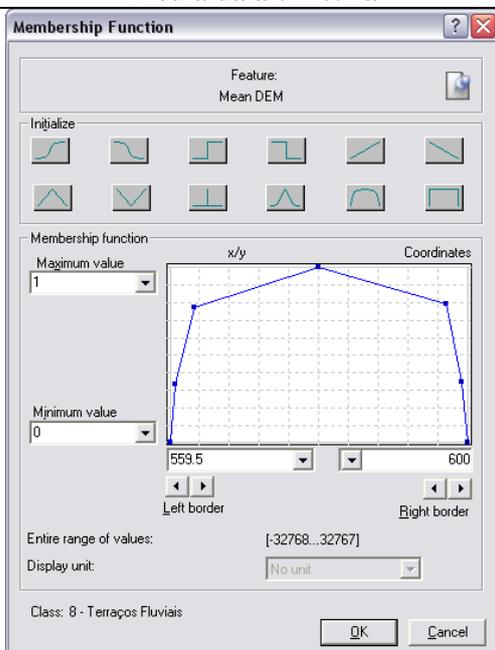


Classe: Terraços fluviais

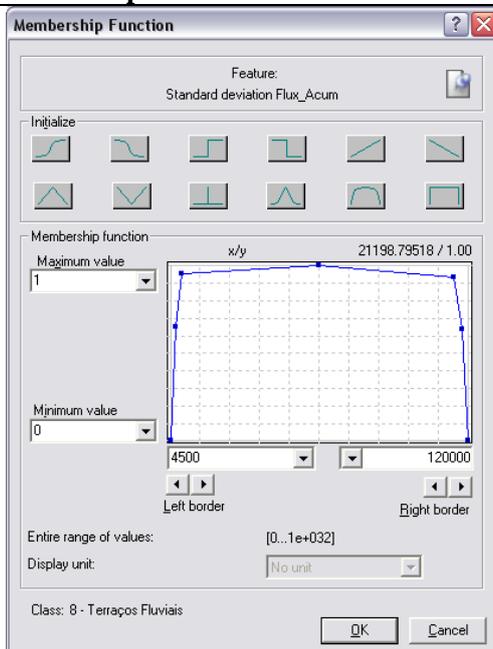
Atributos:

Média da altimetria

Média da curvatura vertical



Desvio padrão do fluxo acumulado



Classe: Morrotes

Atributos:

Média da altimetria

Membership Function

Feature: Mean DEM

Initialize

Membership function

Maximum value: 1

Minimum value: 0

Left border: 736

Right border: 831

Entire range of values: [-32768...32767]

Display unit: No unit

Class: 6 - Morrotes

OK Cancel

Amplitude altimétrica

Membership Function

Feature: Amplitude Altimétrica

Initialize

Membership function

Maximum value: 1

Minimum value: 0

Left border: 139

Right border: 172

Entire range of values: [-1e+100...1e+100]

Display unit: No unit

Class: 6 - Morrotes

OK Cancel

Desvio-padrão da altimetria

Membership Function

Feature: Standard deviation DEM

Initialize

Membership function

Maximum value: 1

Minimum value: 0

Left border: 29

Right border: 42

Entire range of values: [0...32768]

Display unit: No unit

Class: 6 - Morrotes

OK Cancel

Desvio-padrão da entropia

Membership Function

Feature: Standard deviation Entropia

Initialize

Membership function

Maximum value: 1

Minimum value: 0

Left border: 0.33

Right border: 0.42

Entire range of values: [0...1e+032]

Display unit: No unit

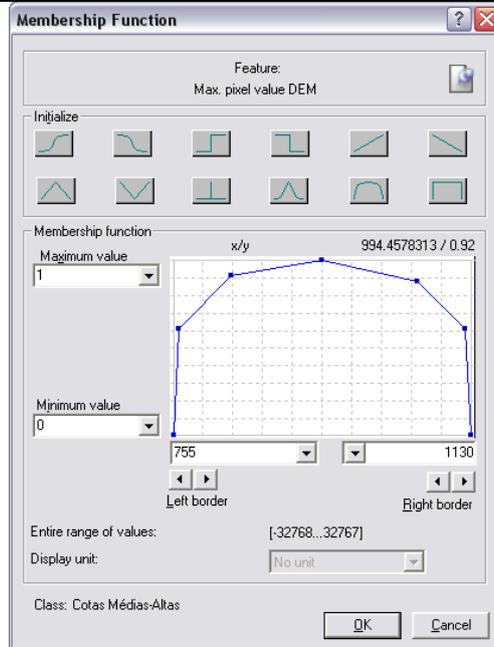
Class: 6 - Morrotes

OK Cancel

Classe: Cotas Médias-Altas

Atributos:

Valores máximos de altimetria

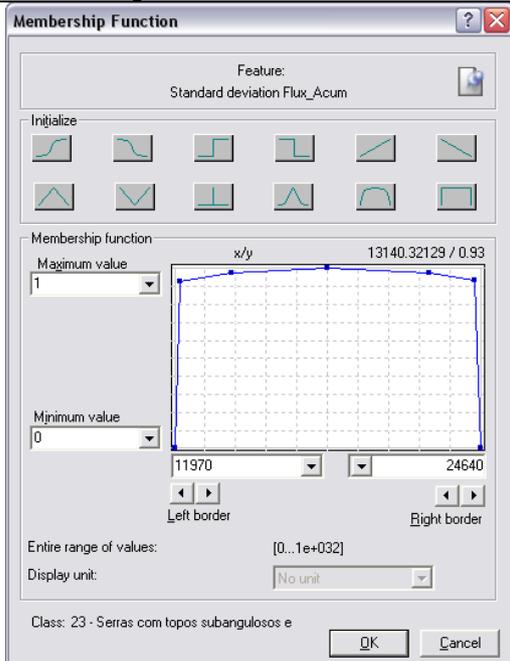


Subclasse: Montanhas tipo 1

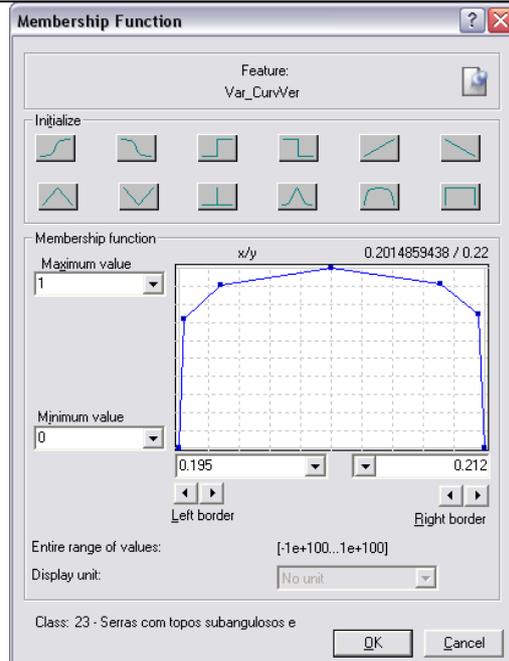
Subclasse: Montanhas tipo 1 (real)

Atributos:

Desvio padrão do fluxo acumulado



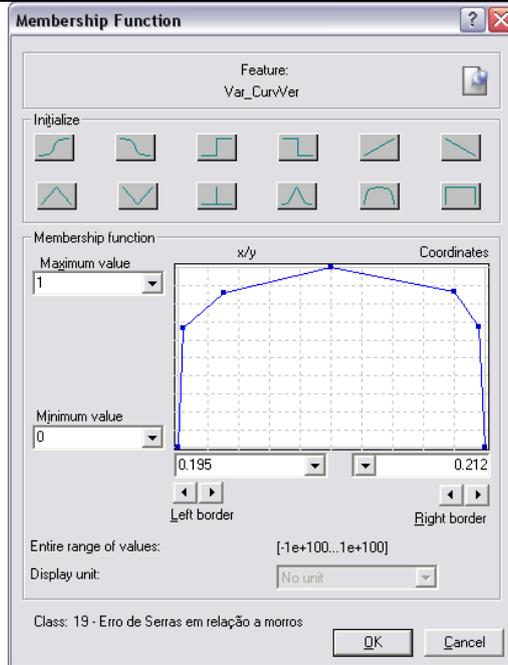
Variância da curvatura vertical



Erros de comissão relativos à classe “Morros tipo 2”:

Atributos:

Variância da curvatura vertical

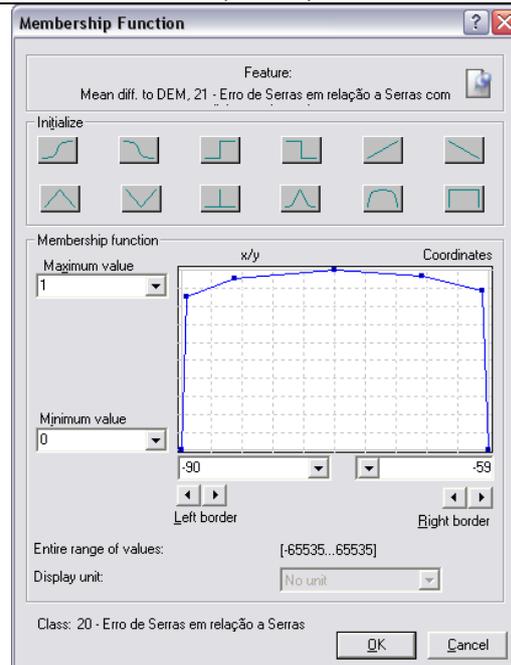
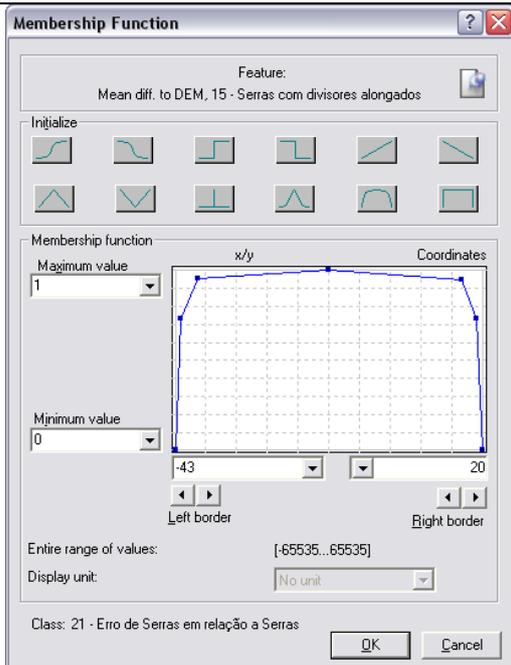


Erros de comissão relativos à classe “Montanhas tipo 2”:

Atributos:

Diferença média da altimetria entre a classe “Montanhas tipo 2” (ciclo 1)

Diferença média da altimetria entre os erros de comissão relativos à “Montanhas tipo 2” (ciclo 2)

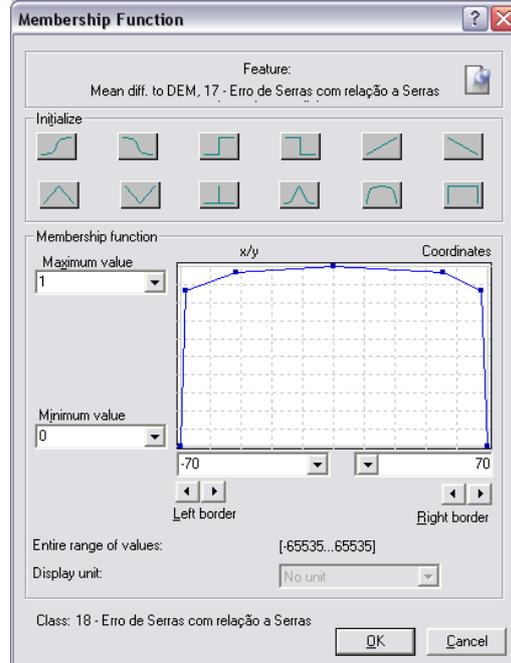
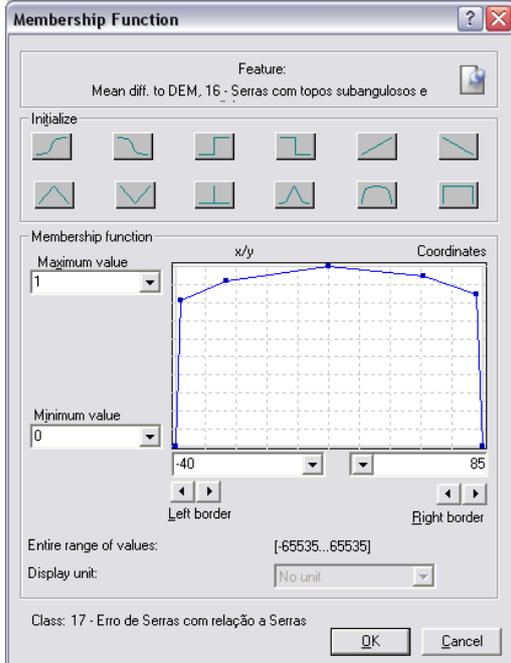


Erros de comissão relativos à classe “Montanhas tipo 3”:

Atributos:

Diferença média da altimetria entre a classe “Montanhas tipo 3”

Diferença média da altimetria entre os erros de comissão relativos à “Montanhas tipo 3”

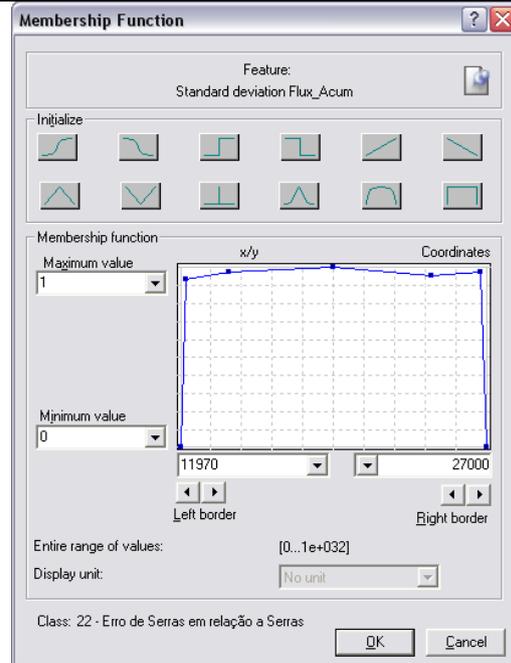
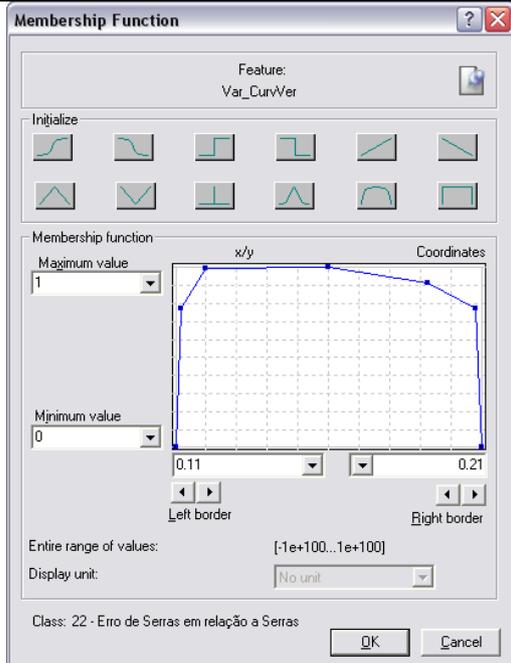


Erros de comissão relativos à classe “Serras escarpadas tipo 2”:

Atributos:

Variância da curvatura vertical

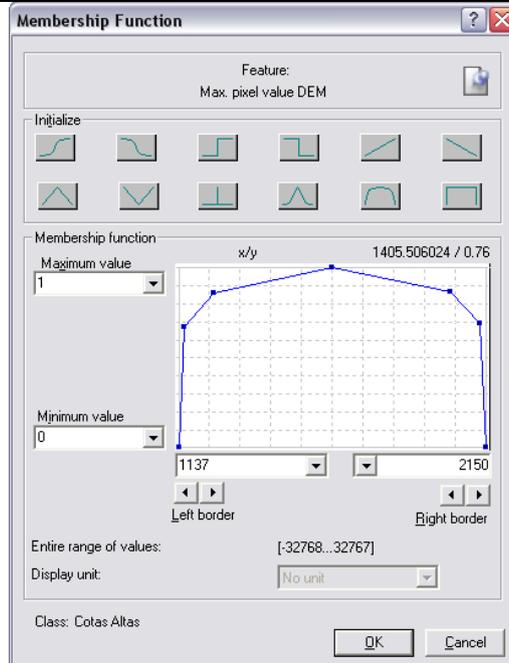
Desvio padrão do fluxo acumulado



Clase: Cotas Altas

Atributos:

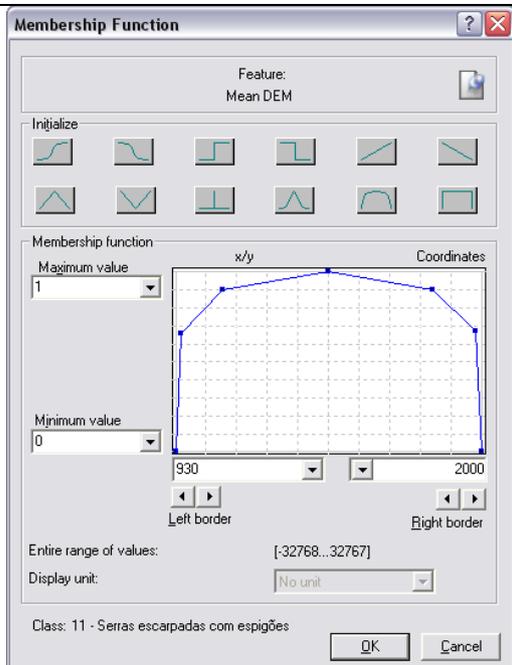
Valores máximos de altimetria



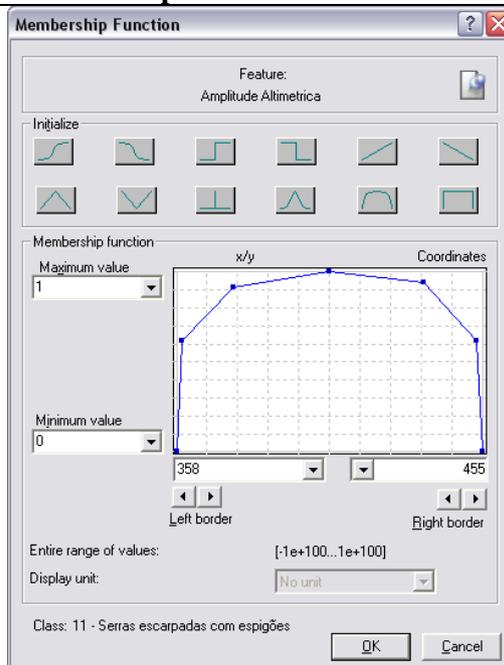
Subclasse Serras escarpadas tipo 1:

Atributos:

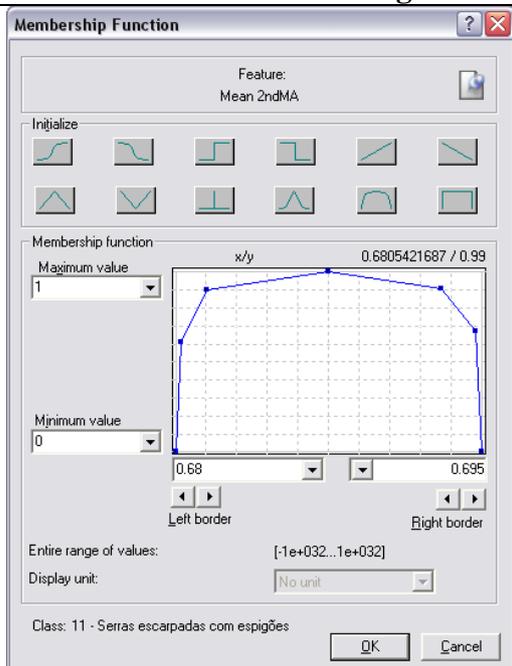
Média da altimetria



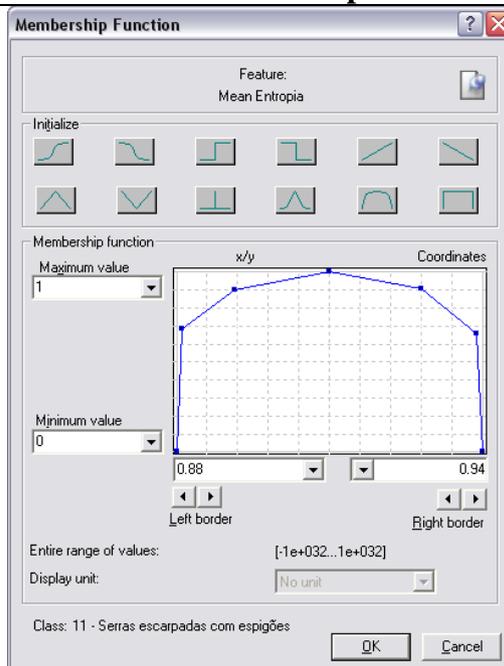
Amplitude altimétrica



Média do 2º momento angular



Média da entropia



Subclasse Serras escarpadas tipo 2:

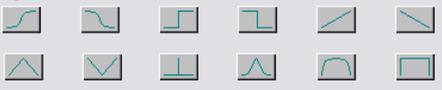
Atributos:

Média da altimetria

Membership Function

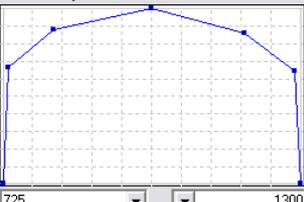
Feature: Mean DEM

Initialize



Membership function

Maximum value: 1



Minimum value: 0

Coordinates: 725 (Left border) 1300 (Right border)

Entire range of values: [-32768...32767]

Display unit: No unit

Class: 12 - Serras escarpadas com divisores

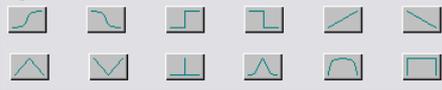
OK Cancel

Variância do fluxo acumulado

Membership Function

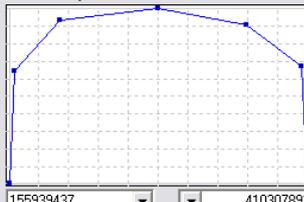
Feature: Var_Flux_Acum

Initialize



Membership function

Maximum value: 1



Minimum value: 0

Coordinates: 155939437 (Left border) 410307892 (Right border)

Entire range of values: [-1e+100...1e+100]

Display unit: No unit

Class: 12 - Serras escarpadas com divisores

OK Cancel