

Mapeamento geomorfológico semi-automatizado por meio de análise orientada a objeto multinível e dados ASTER/Terra

Flávio Fortes Camargo
Teresa Gallotti Florenzano
Cláudia Maria de Almeida
Cleber Gonzales de Oliveira

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{fortes, teresa, almeida, cleber}@dsr.inpe.br

Abstract. This research aimed to develop a semi-automatic geomorphological mapping methodology using object-based image analysis and ASTER/Terra data. 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 (with known accuracy), obtained from the pair of stereoscopic ASTER/Terra images. For the analysis, objects were generated by a four-level multiresolution segmentation, taking into account specific variables. The hierarchical semantic net was initially conceived to classify the geomorphological macrounits and was then further detailed to allow a finer classification, which amounted to eleven classes of detailed geomorphological units. In order to accomplish the classification evaluation, object-based statistical indices (producer's accuracy, consumer's accuracy, global accuracy, Kappa index and Tau index) were derived from a contingency table, obtained by means of a comparison between the classified scene and a reference map. The values of the global accuracy (84,2%), Tau (82,7%) and Kappa (81,2%) indices indicate a strong agreement. The object-based image analysis has shown to be a suitable method for semi-automatic procedures in geomorphological mapping.

Palavras-chave: remote sensing, digital images processing, multiresolution segmentation, fuzzy logic, sensoriamento remoto, processamento digital de imagens, segmentação multiresolução, lógica nebulosa.

1. Introdução

O Sensoriamento Remoto é uma das principais fontes de dados nas atividades de mapeamento geomorfológico. Desde as suas origens, fotografias aéreas têm sido amplamente utilizadas em procedimentos monoscópicos e estereoscópicos de interpretação visual. Atualmente, uma ampla gama de novos sensores, aerotransportados e orbitais, adquire dados nas faixas espectrais do visível e de microondas. Aliado a isso, métodos fotogramétricos, radargramétricos, interferométricos e de varreduras a *laser* possibilitam a extração de Modelos Digitais de Elevação (MDEs), úteis às atividades de mapeamento geomorfológico.

Paralelamente aos avanços dos sensores, os desenvolvimentos da computação têm propiciado sistemas sofisticados para análise de dados geográficos e automação de tarefas de mapeamento. A automação é realizada por meio de sistemas computacionais convencionais (SCs) ou sistemas computacionais especialistas (SEs). Os SCs realizam processamento algorítmico e são guiados pelas variáveis estatísticas dos dados, enquanto os SEs empregam estratégias de armazenamento e replicação do conhecimento (MOORE, 2000).

Redes semânticas, oriundas da metodologia de Análise Orientada a Objeto (AOO), têm sido empregadas na realização dessas estratégias (MOORE, 2000). Essas redes consistem em grafos que formalizam e representam o conhecimento humano por meio de um conjunto de nós conectados por arcos. De modo geral, os nós representam objetos, e os arcos, as relações entre eles (BITTENCOURT, 2006). O objeto combina estrutura (atributos) e comportamento (operações) dos dados em uma única entidade (RUMBAUGH et al., 1994).

Atualmente, há o SE comercial Definiens® que realiza tarefas de interpretação de imagens de Sensoriamento Remoto. Esse SE, utilizado no presente trabalho, emprega segmentação multiresolução (na obtenção dos objetos da análise), redes semânticas hierárquicas (armazenamento e representação do conhecimento) e lógica nebulosa (tratamento

de incertezas) (BENZ et. al., 2004). Há exemplos da aplicação desse sistema em atividades semi-automatizadas de mapeamento geomorfológico (ASSELEN; SEIJMONSBERGEN, 2006; CAMARGO, 2008; SCHNEEVOIGT et al., 2008).

Em vista do exposto, constata-se que a cartografia geomorfológica dispõe atualmente de um conjunto de tecnologias que possibilitam o avanço das pesquisas puras e aplicadas sobre o meio físico. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia semi-automatizada de mapeamento de unidades geomorfológicas a partir de uma abordagem que se baseia em conhecimento especialista e variáveis derivadas de um MDE ASTER/Terra.

2. Metodologia

2.1 Área de Estudo

A área de estudo, com 1.098,6 km², corresponde à área do município de São José dos Campos, localizado no médio vale do rio Paraíba do Sul (Figura 1), Estado de São Paulo, Brasil. Esse vale está em um sistema Pré-Cambriano de montanhas, que é a mais proeminente feição orográfica do leste da América do Sul. A litologia é composta de gnaisses (Arqueano ao Proterozóico Médio), suítes graníticas sin e pós-tectônicas (Proterozóico Superior), rochas sedimentares (Terciário Superior) e depósitos quaternários. O relevo é formado de serras, montanhas, planícies aluviais, terraços e colinas sedimentares (DNPM, 1983).

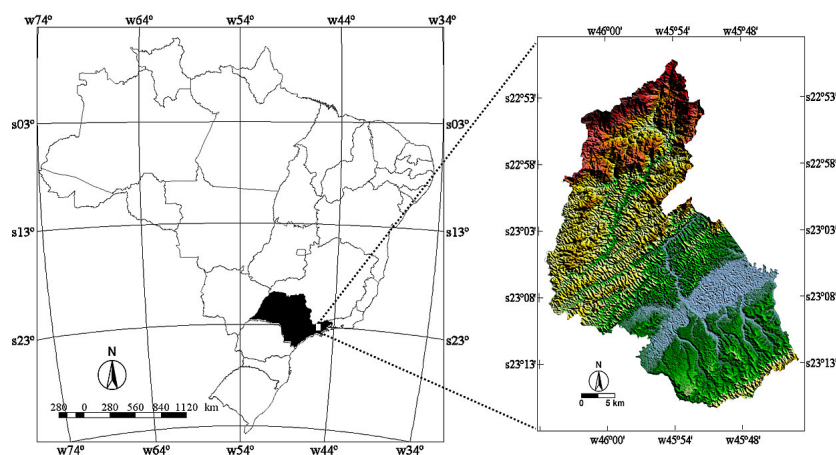


Figura 1 – Localização da área de estudo.

2.2 Material e Pré-processamento dos Dados

Utilizaram-se imagens ASTER/Terra do subsistema sensor VNIR (*Visible and Near Infra-Red*) (3N e 3B de 31/08/2004, nível de processamento L1B); 109 pontos coletados com equipamentos GPS de precisão, arquivos vetoriais (eixo de logradouros, drenagem e curvas de nível); arquivos de pontos cotados e equipamentos para visualização 3D. As imagens foram orientadas por meio do modelo matemático Toutin (módulo OrthoEngine, PCI Geomatica 10.0.3) e de pontos de controle (GCPs – *Ground Control Points*), coletados a partir dos arquivos vetoriais. Posteriormente, extraiu-se o MDE (estereocorrelação e cálculo de paralaxes entre as imagens epipolares), a orto-imagem ASTER/3N, e as variáveis geomorfométricas (declividade, curvaturas horizontal e vertical) e texturais (desvio-padrão, entropia e segundo momento angular). Essas variáveis, o MDE, a banda 3N ortorretificada, o relevo sombreado e o arquivo vetorial da drenagem foram empregados na classificação. Os 109 pontos GPS foram utilizados na validação do MDE. Por outro lado, para a validação da classificação, utilizou-se um mapa independente obtido da interpretação visual do par estereoscópico (imagens epipolares 3N e 3B), cuja legenda adotada é a do sistema ITC (VERSTAPPEN; ZUIDAM, 1991).

2.3 Segmentação Multiresolução e Classificação Orientada a Objeto

Foram realizados quatro níveis de segmentação, sendo que um foi empregado na classificação dos corpos d'água, outro na estimativa da densidade de drenagem, e o restante, na classificação das unidades geomorfológicas. Desse modo, essas unidades foram classificadas em duas etapas: na primeira foram identificadas as grandes unidades morfogeneticamente homogêneas, denominadas de macro-unidades geomorfológicas (Quadro 1), e na segunda, as unidades morfográficas finais da legenda, denominadas de unidades geomorfológicas detalhadas (Quadro 1), contidas nas anteriores. A densidade de drenagem forneceu atributos para a classificação. Com base nesses níveis de segmentação e seus objetos, definiu-se uma rede semântica hierárquica. Inicialmente, essa rede apresentou três níveis de segmentação: o nível 1, no qual se delimitaram os corpos d'água; o nível 2, com as macro-unidades geomorfológicas, e o nível 3, utilizado no cálculo da densidade de drenagem. Esta foi obtida da razão entre a área da rede hidrográfica e a área de cada objeto no nível 3. Na Tabela 1, são apresentadas as variáveis e os parâmetros empregados na segmentação.

Nessa rede inicial, foram classificados os corpos d'água, a densidade de drenagem (em Alta e Média/Baixa) e as macro-unidades: Serras/Montanhas/Morros, Planícies Aluviais, Planícies Aluviais Intermontanas e Colinas Sedimentares. Na análise exploratória, empregaram-se histogramas com valores amostrais dos atributos, calculados a partir dos objetos da segmentação. A Tabela 2 apresenta os atributos das macro-unidades geomorfológicas. Verifica-se a sobreposição de valores/intervalos em algumas classes. Essa confusão foi minimizada através: (i) da utilização do operador nebuloso *AND* e suas funções flexíveis; e (ii) a partir do conceito de herança oriundo da AOO. Esse conceito permitiu a criação de subclasses (Tabela 3), as quais identificaram os objetos corretamente classificados e aqueles referentes aos erros de comissão.

Na sequência, para a segmentação das unidades geomorfológicas detalhadas, foi necessária a fusão dos objetos do nível 2 (macro-unidades geomorfológicas). Para tal, utilizou-se o recurso de agrupamento de objetos (*merge*), disponível no sistema Definiens®. Assim, os objetos de cada macro-unidade geomorfológica foram agrupados, e posteriormente, houve a segmentação das unidades geomorfológicas detalhadas, no interior desses objetos. Essa segmentação foi realizada em um novo nível na imagem de relevo sombreado (elevação solar = 45° e azimute = 315°), na qual os lineamentos, fraturas e feições geomórficas são realçados (SOULAKELLIS et al., 2006).

Como no agrupamento de objetos realiza-se a fusão de objetos de níveis superiores, foi necessária a reorganização dos níveis para a preservação das bordas das 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 ficaram no nível 4. A Tabela 1 apresenta a variável e os parâmetros de segmentação das unidades geomorfológicas detalhadas. As Tabelas 4, 5 e 6 apresentam os atributos empregados na classificação semi-automatizada dessas unidades. Para incrementar os resultados fornecidos pela rede semântica, foram empregadas rotinas de pós-processamento de dois algoritmos disponíveis no sistema Definiens® (versão 5.0): (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. O segundo (ii) também classifica (ou re-classifica) objetos de acordo com valores extremos de um dado atributo, verificados nas vizinhanças dos objetos (DEFINIENS, 2006). Esses algoritmos têm interface gráfica para usuário e podem ser parametrizados.

Tabela 1 – Variáveis e parâmetros (e = fator de escala; c = cor; f = forma; comp. = compacidade e suav. = suavidade) utilizados nos procedimentos de segmentação.

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

Tabela 2 – Atributos das macro-unidades geomorfológicas e reservatórios.

Unidades	Atributos
Serras/MontanhasMorros	alta densidade de drenagem (nível 3); média da altimetria entre 572 e 2100m; média da declividade entre 4,9° e 34,9°.
Colinas Sedimentares	média da altimetria entre 560 e 688m; média da entropia entre 1,2 e 2,2; média da declividade entre 2,5° e 12°.
Planícies Aluviais	média da entropia entre -0,01 e 1,5; média da declividade entre 1,4° e 10°.
Planícies Aluviais Intermontanas	amplitude altimétrica entre 10 e 12m; média da altimetria entre 678 e 687m; média da declividade entre 2,88° e 4,75°.
Reservatórios	existência de corpos d'água no nível 1. *atributos empregados no nível 1: média da altimetria entre 609 e 707m e média do número digital da banda 3N entre 14 e 46.

Tabela 3 – Atributos empregados no refinamento das macro-unidades geomorfológicas, a partir de subclasses de erros de comissão.

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

Tabela 4 – Atributos das formas de agradação (unidades geomorfológicas detalhadas).

Formas de agradação	Atributos
Planícies Aluviais	inseridas na macro-unidade Planícies Aluviais.
Planícies Aluviais Intermontanas	inseridas na macro-unidade Planícies Aluviais Intermontanas.
Terraços	inseridos na macro-unidade Planícies Aluviais; média da altimetria entre 559,5 e 600m; exceto para média da curvatura vertical entre -0,17 e -9,999; exceto para desvio padrão do fluxo acumulado entre 4.500 e 120.000 pixels.

Tabela 5 – Atributos das formas de denudação (unidades geomorfológicas detalhadas).

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

Tabela 6 – Atributos das formas estruturais-denudacionais (unidades geomorfológicas detalhadas).

Formas estruturais-denudacionais	Atributos
Morros Arredondados	inseridos na macro-unidade Serras/Montanhas/Morros; média da altimetria entre 538 e 694,5m; variância da curvatura horizontal entre 8,4 e 14,15; exceto para variância da curvatura vertical entre 0,11 e 0,208.
Morros Alongados e Paralelos	inseridos na macro-unidade Serras/Montanhas/Morros; média da altimetria entre 538 e 694,5m valores máximos de altimetria entre 658 e 790m;
Serras Médias-Altas	inseridas na macro-unidade Serras/Montanhas/Morros; valores máximos de altimetria entre 740 e 1130m;
Serras Altas	valores máximos de altimetria entre 1137 e 2150m; média da altimetria entre 725 e 1300m;
Serras Altas e Escarpadas	inseridas na macro-unidade Serras/Montanhas/Morros; valores máximos de altimetria entre 1137 e 2150m; média da altimetria entre 930 e 2000m; exceto para média do segundo momento angular 0,68 e 0,695;

Quadro 1 – Classes de unidades geomorfológicas e processos morfogenéticos predominantes.

Macro-Unidades Geomorfológicas	Unidades Geomorfológicas Detalhadas	Processos Dominantes
Planícies Aluviais	Planícies Aluviais Terraços Fluviais	Agradação
Planícies Aluviais Intermontanas	Planícies Aluviais Intermontanas	
Colinas Sedimentares	Colinas Amplas Colinas Pequenas Colinas Tabulares	Denudação
Serras/Montanhas/Morros	Morros Arredondados Morros Alongados e Paralelos Serras Médias-Altas Serras Altas Serras Altas e Escarpadas	Tectonismo-Denudação

3. Resultados e Discussões

Os resultados da validação do MDE ASTER/Terra (Figura 2) concordam com trabalhos na mesma linha de pesquisa (TOUTIN, 2008), com destaque para o Erro Médio Quadrático (EMQ) de 9,38 m. Observa-se também que a hipótese nula do teste *t* de Student ($t_{(n-1, 5\%)} > t_{amostral}$) não foi atendida e que o MDE apresentou tendência positiva. Esse resultado é coerente, pois o MDE sofre a interferência da altura de diferentes tipos de cobertura da terra. A Figura 2 ilustra as áreas sem dados (problemas na extração das paralaxes), os pontos GPS utilizados e uma pequena região na margem oeste da área de estudo não incluída no MDE.

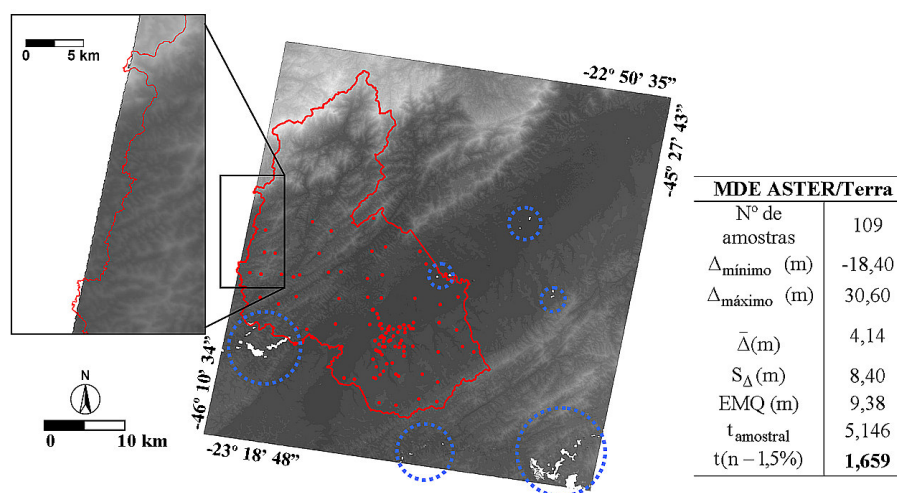


Figura 2 – MDE, pontos GPS (em vermelho), ausência de dados (círculos tracejados em azul) e limite de cobertura da cena (retângulo).

Na Tabela 7, é apresentada a matriz de erros da classificação das unidades geomorfológicas detalhadas e os resultados da acurácia global e dos índices Kappa e Tau. Na Figura 3, está o mapa final obtido e a rede semântica hierárquica concebida no sistema Definiens®.

Pela análise dos erros de comissão (linhas) e omissão (colunas), verifica-se que a classe “Planícies Aluviais” apresentou confusão com a classe “Terraços”. Isso se deve, principalmente, às características geomorfométricas similares (declividade e altimetria) entre ambas as classes. No caso das unidades com gênese estrutural-denudacional, erros significativos ocorreram entre as classes “Serras Médias-Altas” e “Morros Alongados e Paralelos” e, também, entre as classes “Serras Altas e Escarpadas” e “Serras Altas”. Apesar de morfograficamente distintas, essas classes são morfometricamente semelhantes em determinados atributos, tais como altimetria.

Foram observados poucos erros entre classes de domínios morfogenéticos distintos (entre terrenos sedimentares quaternários e terrenos cristalinos pré-cambrianos, por exemplo). Isso se deve à adequada separação desses domínios na etapa de classificação das macro-unidades geomorfológicas. Como o sistema Definiens® permite a classificação multinível, regras considerando outras etapas de classificação foram inseridas na rede semântica hierárquica, de modo a minimizar a confusão na classificação final. De acordo com a classificação de Landis e Koch (1977), o índice Kappa obtido (Tabela 7) é considerado de “forte concordância”.

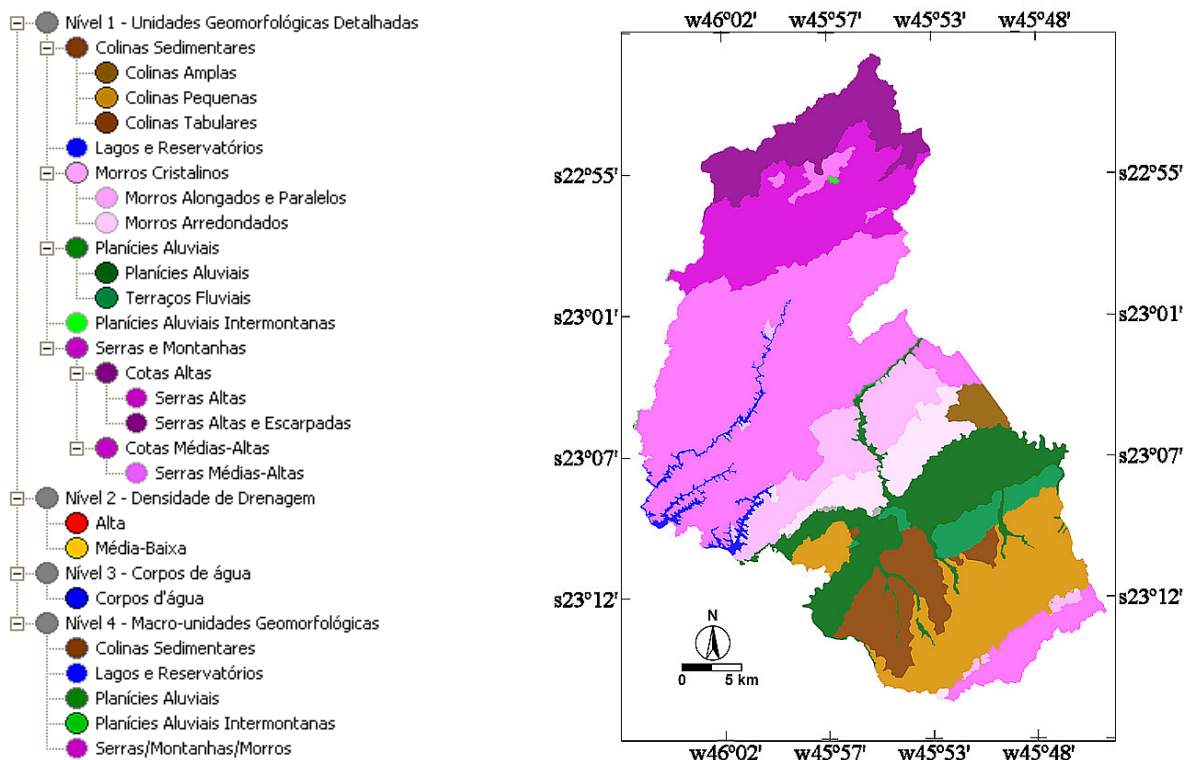


Figura 3 – Rede semântica hierárquica final e classificação das unidades geomorfológicas detalhadas.

Tabela 7 – Matriz de erros e estatísticas de validação da classificação das unidades geomorfológicas detalhadas.

Classificação	Referência											nc	Legenda:		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11				
1	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Colinas Amplas
2	0	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	Colinas Pequenas
3	0	2	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	Tabuleiros
4	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	Morros Convexos
5	0	0	0	0	19	0	0	0	0	0	0	10	0	5	Morros Alongados e Paralelos
6	0	0	0	0	0	75	0	0	0	0	0	0	0	6	Planícies Aluviais
7	0	2	0	0	0	7	15	0	0	0	0	0	0	7	Terraços
8	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	8	Planícies Aluviais Intermontanas
9	0	0	0	0	0	0	0	0	12	3	0	0	0	9	Serras Altas e Escarpadas
10	0	0	0	0	0	0	0	0	8	19	0	0	0	10	Serras Altas
11	0	0	0	0	7	0	0	0	1	5	83	0	0	11	Serras Médias-Altas
nc	0	2	0	0	0	1	0	0	0	0	5	7	0	nc	Não Classificados

Índice Kappa = 0,812
Índice Tau = 0,823
Acurácia Global = 0,842

4. Conclusões

O método utilizado nesta pesquisa demonstrou a viabilidade de uma classificação semi-automatizada de unidades geomorfológicas. Esse procedimento não seria possível em sistemas convencionais de processamento digital de imagens, os quais operam apenas com informações estatísticas das regiões e com um único nível de segmentação.

Os resultados da rede semântica hierárquica sugerem que ela pode ser replicável para outras áreas de estudo 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. Isso, no entanto, deve ser testado em trabalhos futuros.

Outro desafio é a diminuição do tempo na seleção de atributos e determinação de suas respectivas funções nebulosas. Nesse sentido, métodos que otimizem essas tarefas devem ser explorados.

Agradecimentos

Os autores agradecem às instituições de fomento à pesquisa CAPES e CNPq; à FINEP/SEBRAE (Proc. 2799/06); aos dados GPS fornecidos por FUNCATE, INPE e IEAv; e ao Dr. Carlos Roberto de Souza Filho (IG-UNICAMP), pela cessão das imagens ASTER/Terra.

Referências Bibliográficas

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.

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

Camargo, F. F. **Análise orientada a objeto aplicada ao mapeamento de unidades geomorfológicas a partir de dados ASTER/Terra**. 171 p. (INPE-15253-TDI/1339). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos (SP). 2008.
Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/03.17.19.50>>. Acesso em: 16.nov.2008.

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

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

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

Moore, T. Geospatial expert systems. In: Openshaw, S.; Abraham, R. J. (Ed.). **Geocomputation**. London: Taylor & Francis, 2000.

Rumbaugh, J.; Blaha, M.; Premerlani, W.; Eddy, F.; Lorensen, W. **Modelagem e projetos baseados em objetos**. Rio de Janeiro/RJ: Campus, 1994.

Schneevoigt, N. N., Van der Linder, S., Thamm, H.-P.; Schrott, L. Detecting Alpine landforms from remotely sensed imagery: A pilot study in the Bavarian Alps. **Geomorphology**, 93, 104–119, 2008.

Soulakellis, N. A., Novak, I. D., Zouros, N., Lowman, P., Yates, J. Fusing Landsat-5/TM imagery and shaded relief maps in tectonic and geomorphic mapping: Lesvos Island, Greece. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, 72, 693-700, 2006.

Toutin, T. ASTER DEMs for geomatic and geoscientific applications: a review. **International Journal of Remote Sensing**, 29, 1855-1875, 2008.

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.