

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

THAÍS MINATEL TINÓS

CLASSIFICAÇÃO AUTOMATIZADA DO RELEVO A PARTIR DE
PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador:
Prof. Dr. José
Eduardo Zaine

Rio Claro - SP

2016

550 Tinós, Thaís Minatel
T591c Classificação automatizada do relevo a partir de
parâmetros morfométricos / Thaís Minatel Tinós. - Rio Claro,
2016
177 f. : il., figs., tabs., quadros

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista,
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: José Eduardo Zaine

1. Geologia. 2. SRTM. 3. Modelo digital de elevação. 4.
Padrões de formas semelhantes do relevo. 5. Parâmetros
geomorfométricos. I. Título.

THAÍS MINATEL TINÓS

CLASSIFICAÇÃO AUTOMATIZADA DO RELEVO A PARTIR DE PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. José Eduardo Zaine - Orientador
Departamento de Geologia Aplicada - UNESP

Prof. Dr. Rodrigo José Pisani
Instituto de Ciências da Natureza - Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Carlos Henrique Grohmann de Carvalho
Instituto de Energia e Ambiente - Universidade de São Paulo

Profa. Dra. Paulina Setti Riedel
Departamento de Geologia Aplicada - UNESP

Profa. Dra. Cenira Maria Lupinacci
Departamento de Planejamento Territorial e Geoprocessamento - UNESP

Rio Claro, SP 31 de março de 2016.

AGRADECIMENTOS

À Cnpq e a Capes pelo auxílio financeiro através da bolsa de doutorado e dos recursos de reserva técnica.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Eduardo Zaine, pela estima e confiança depositadas em mim durante esses anos de convivência.

Às professoras Paulina Setti Riedel e Cenira Maria Lupinacci pelas valiosas contribuições no exame de qualificação, pela motivação, atenção, apoio e, sobretudo, pelas críticas sempre construtivas durante o transcorrer das atividades da tese.

Aos professores Rodrigo José Pisani e Carlos Henrique Grohmann por toda a atenção e excelentes contribuições no processo de defesa.

À querida Rosângela Vacello, sempre disposta a ajudar e resolver os mais diversos problemas.

A meus pais Dirceu e Neuza e minha queridíssima vó Neide pelo amor, carinho e por proporcionarem oportunidades que me trouxeram até aqui.

Aos queridos amigos Cibele, Marcelo, Marina, Chuleta, Flavio e Leandro por compartilharem momentos de alegria e muito trabalho durante a pós-graduação. E também às amigas Renata, Débora e Talita por estarem sempre presentes, ouvindo e apoiando em todos os momentos.

Ao meu marido e melhor amigo, Mateus, pela grande ajuda com o software ArcGIS, com os trabalhos de campo e principalmente pela infinita paciência, compreensão e incentivo.

Por fim, à todos os meus queridos familiares e amigos, os que estão perto e os que estão longe, obrigada pelo suporte, amizade e por terem de alguma forma estado presentes em alguns momentos de trabalho árduo.

“O primeiro pecado da humanidade foi a fé;
a primeira virtude foi a dúvida.”
(CARL SAGAN)

RESUMO

Representar cartograficamente o relevo de maneira sistemática não é uma tarefa simples devido à complexidade das informações que devem ser necessariamente relatadas. O uso de processos interpretativos e subjetivos dificulta ainda mais a comparação e aplicação das metodologias por diferentes pesquisadores. Uma das formas de mudar esse quadro é substituir alguns desses processos por uma sequência de procedimentos quantitativos relativos à geomorfometria do terreno. Nesse contexto, o principal objetivo da pesquisa é propor um método de classificação automatizada do relevo a partir de um modelo digital de elevação, parâmetros e ferramentas que possibilitem uma abordagem quantitativa. Foram elaborados três experimentos que abrangem desde o desenvolvimento de produtos intermediários, obtidos através de técnicas de visualização de modelos digitais de elevação que auxiliam no reconhecimento prévio da área estudada até a proposição de uma metodologia de classificação de padrões de formas semelhantes do relevo a partir dos parâmetros de declividade, amplitude e perfil do relevo. O planalto de Poços de Caldas e a bacia do rio Corumbataí foram selecionados como áreas de estudo devido a seus relevos contrastantes, além da disponibilidade de dados e conhecimento prévio dos autores, item primordial para a realização de uma classificação automatizada do relevo. Os resultados finais englobaram mapas de classificação do relevo que retratam as unidades com padrões de formas semelhantes em escalas compatíveis a 1:100.000 (SRTM de 90 metros de resolução) e 1:50.000 (SRTM de 30 metros de resolução). Esses mapas fornecem uma visão geral da geomorfologia da área, podendo servir de base para diversos outros mapeamentos como geotécnico, geológico, pedológico, zoneamento geoambiental e geomorfológico de detalhe.

Palavras-chave: SRTM; Modelo digital de elevação; Padrões de formas semelhantes do relevo; Parâmetros geomorfométricos.

ABSTRACT

The cartographic representation of the relief is not a simple task due to the complexity of information to be reported. Subjective and interpretative processes involved make it difficult to compare and to apply methodologies carried by different researchers. This scenario can be altered if a sequence of quantitative procedures related to terrain geomorphometry is applied. In this context, the main objective of this research is to propose a method for automated classification of relief from a digital elevation model, parameters and tools that enable a quantitative approach. Three experiments were elaborated. The first one aimed the development of intermediate products obtained from digital elevation models visualization techniques that assist in prior recognition of the studied area and the last two comprise the development of a landform patterns classification methodology from the parameters flatness, local relief and profile. The Poços de Caldas Plateau and the Corumbataí river basin were selected as study areas due to their contrasting reliefs, besides the availability of data and prior knowledge of the authors, primary item to perform an automated relief classification. The results include relief classification maps that depict landform patterns units in compatible scales with 1:100.000 (SRTM 90 meters resolution) and 1:50.000 (SRTM 30 meters resolution). These maps provide an overview of geomorphology and it can provide the basis for several other mappings as geotechnical, geological, geoenvironmental zoning and detailed geomorphological maps.

Keywords: SRTM; Digital elevation model; Landform patterns; Geomorphometric parameters.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área do Planalto de Poços de Caldas	20
Figura 2. Mapa de compartimentos geomorfológicos do planalto de Poços de Caldas.	22
Figura 3. Mapa geológico do planalto de Poços de Caldas.	28
Figura 4. Localização da área da bacia do rio Corumbataí.	30
Figura 5. Mapa geológico da bacia do rio Corumbataí.	32
Figura 6. Unidades de relevo presentes na bacia do rio Corumbataí segundo o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo modificado por Zaine e Zaine (2009).	36
Figura 7. Perfil esquemático das superfícies de erosão delimitadas por Penteado (1976).	38
Figura 8. Distribuição dos solos na Bacia do rio Corumbataí segundo Mendes (2004).	39
Figura 9. Níveis hierárquicos do método de sistemas do relevo.	52
Figura 10. Ordem taxonômica proposta por Ross (1992).	62
Figura 11. Resultados obtidos a partir de variadas técnicas de classificação do relevo.	69
Figura 12. Resultados obtidos em trabalhos que empregaram a metodologia proposta por Hammond (1954, 1964) e adaptada por Dikau, Brabb e Mark (1991).	76
Figura 13. Fluxograma da pesquisa.	77
Figura 14. Representação dos parâmetros calculados. A – Declividade, B - Amplitude (relevo local), C - Perfil de Relevo.	90
Figura 15. Exemplo de interpretação dos valores gerados.	92
Figura 16. Pontos amostrais obtidos em trabalho de campo e escritório.	93
Figura 17. Pontos referentes as amostras de avaliação.	97
Figura 18. Área com espaços em branco originados nos contatos entre as unidades e área após o processo de preenchimento e suavização.	98
Figura 19. Diagrama do desenvolvimento do Experimento 3.	99
Figura 20. Pontos de validação obtidos em trabalho de campo e escritório.	101
Figura 21. Produto resultante da técnica 1 (Curvatura em perfil) e gráficos representativos do perfil de elevação e frequência de curvatura nos trechos A-B e C-D.	103
Figura 22. Produto resultante da técnica 2 (Declividade); A. Serra de São Domingos; B. Planície fluvial do ribeirão das Antas em contato com relevo colinoso nas	

proximidades do aeroporto; C. Visão a sudeste da Represa Saturnino de Brito; D. Trecho do dique anelar fotografado da Serra do Gavião.	105
Figura 23. A. Produto resultante da técnica 3 (Realce por filtro adaptativo); B. Imagem de um trecho do vale aberto do ribeirão das Antas; C. Padrão de drenagem treliça associado a fraturas nas Serras do Boqueirão e da Fumaça; D. Padrão de drenagem dendrítico e sub-dendrítico associado a bacia do rio Pardo e drenagem encaixada em fratura no sopé do Serrote do Maranhão; E. Padrão de drenagem semi-radial centrífugo no interior do planalto.	106
Figura 24. Produto resultante da técnica 4 (Relevo sombreado com azimuth de iluminação de 50°); B - Produto resultante da técnica 4 (Relevo sombreado com azimuth de iluminação de 320°).	107
Figura 25. A – Visualização combinada 1 (modelo digital de elevação (em uma escala de cores) + relevo sombreado com azimuth de 50°); B - Visualização combinada 2 (modelo digital de elevação (com uma escala de cores) + declividade (com a escala de cores do branco para o preto).	109
Figura 26. A - Visualização combinada 3 (Composição colorida entre os azimutes 50° e 320°); B- Principais lineamentos, alinhamentos de relevo e estruturas circulares identificados a partir da visualização combinada 3.	110
Figura 27. A - Visualização combinada 4 (Composição colorida entre os azimutes 50° e 320° e a declividade); B – Mapa de compartimentos geomorfológicos delimitados a partir da visualização combinada 4.	111
Figura 28. Resultados obtidos com os diferentes tamanhos de janela móvel testados.	114
Figura 29. Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo, resultante da janela de 10X10 pixels.	116
Figura 30. Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo, após a etapa de reclassificação.	119
Figura 31. Relevo montanhoso do dique anelar visto a partir da MG – 455 a caminho de Andradadas.	121
Figura 32. Colinas e morros baixos no interior da caldeira.	122
Figura 33. Aeroporto de Poços de Caldas localizado na planície aluvial do ribeirão das Antas.	123
Figura 34. Relevo de morros altos e morros baixos na área do Morro Grande, no interior do planalto de Poços de Caldas.	123
Figura 35. Pedra do Elefante, localizada na Serra do Pau D´alho em meio ao relevo de montanhas e morros baixos.	124
Figura 36. Relevo colinoso com declividades suaves observado na região de Andradadas.	125

Figura 37. Represa da Graminha e relevo de colinas no norte da área.	126
Figura 38. Morros baixos em forma de “meia laranja” localizados na região nordeste da área.	126
Figura 39. Relevo ondulado com colinas e morros nas proximidades da cidade de Caldas.	127
Figura 40. Desempenho dos grupos de classe por tamanhos de janela móvel.	129
Figura 41. Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo resultante das janelas personalizadas para cada grupo de classe.	131
Figura 42. Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo, após a etapa de reclassificação.	133
Figura 43. Descontinuidade de relevo gerada pela erosão regressiva do rio Passa-cinco.	135
Figura 44. Principais formações cuestiformes ocorrentes na bacia do rio Corumbataí.	136
Figura 45. Perfil topográfico da área de transição entre as Cuestas arenito-basálticas e a Depressão Periférica.	137
Figura 46. Ocorrências do grupo de Morros baixos na área de estudo.	138
Figura 47. Perfil topográfico da Superfície Rio Claro.	139
Figura 48. Ocorrências do grupo de Colinas na área de estudo.	140
Figura 49. Ocorrências dos Terrenos planos na área de estudo.	142
Figura 50. Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo da bacia do rio Corumbataí.	145

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Sequência de eventos geológicos conforme modelo de cratera proposto por Ellert (1959).....	26
Quadro 2. Ordenação Taxonômica utilizada no Projeto RADAMBRASIL.	58
Quadro 3. Matriz dos índices de dissecação do relevo utilizada por Ross e Moroz (1997) no Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo.	60
Quadro 4. Ordenação Taxonômica utilizada no mapa geomorfológico do estado de São Paulo elaborado por Ross e Moroz (1997).	61
Quadro 5. Síntese das principais características e limitações dos estudos dos parâmetros geomorfométricos e de classificações automáticas das formas de relevo.	71
Quadro 6. Materiais utilizados nos experimentos.	79
Quadro 7. Elementos de análise do relevo e suas respectivas classes de análise...85	
Quadro 8. Legenda para classificação do relevo propostas por Dikau, Brabb e Mark (1991).....	91
Quadro 9. Melhores produtos para o estudo de cada elemento de análise do relevo.	112
Quadro 10. Classes geradas e seus respectivos grupos representativos das formas de relevo.....	113
Quadro 11. Reclassificação das classes com áreas menores que 1% da área total mapeada.	117
Quadro 12. Classes geradas e seus respectivos grupos representativos das formas de relevo.....	129
Quadro 13. Reclassificação das classes com áreas menores que 1% da área total mapeada.	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Classes do parâmetro de Declividade propostas por Hammond (1954) e adaptadas por Dikau, Brabb e Mark (1991).....	88
Tabela 2. Classes do parâmetro Amplitude (relevo local) propostas por Hammond (1954) e adaptadas por Dikau, Brabb e Mark (1991).	89
Tabela 3. Classes do parâmetro Perfil do Relevo propostas por Hammond (1954) ,adaptadas por Dikau, Brabb e Mark (1991).....	90
Tabela 4. Qualidade da classificação segundo intervalos do coeficiente de concordância Kappa.....	94
Tabela 5. Acerto geral, coeficiente de concordância Kappa e categorias de concordância Kappa, segundo Landis e Koch (1977) para todos os tamanhos de janela móvel testados.....	115
Tabela 6. Classes de padrões de formas semelhantes do relevo geradas e respectivas áreas de ocorrência.....	117
Tabela 7. Matriz de erro e o coeficiente de concordância Kappa para o mapa de padrões de formas semelhantes do relevo, após a etapa de reclassificação.	120
Tabela 8. Acurácia do usuário e a acurácia de produção para o mapa de padrões de formas semelhantes do relevo, após a etapa de reclassificação.	120
Tabela 9. Desempenho do melhor tamanho de janela móvel para cada grupo de classe.	130
Tabela 10. Classes de padrões de formas semelhantes do relevo geradas e respectivas áreas de ocorrência.....	130
Tabela 11. Matriz de erro e o coeficiente de concordância Kappa para o mapa de padrões de formas semelhantes do relevo após a etapa de reclassificação.	134
Tabela 12. Acurácia do usuário e a acurácia de produção para o mapa de padrões de formas semelhantes do relevo após a etapa de reclassificação.	134

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 HIPÓTESE E OBJETIVOS	17
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	19
3.1. Planalto de Poços de Caldas	19
3.2 Bacia do rio Corumbataí	29
4 EMBASAMENTO TEÓRICO METODOLÓGICO	41
4.1 Conceituação	41
4.2 Breve Histórico dos Sistemas de Classificação do Relevo	44
4.3 Classificações do relevo brasileiro	55
4.4 Geomorfometria	63
4.5 Classificação automatizada do relevo	67
4.5.1 A metodologia de Hammond (1954, 1964)	74
5 MATERIAIS E MÉTODOS	77
5.1 Revisão bibliográfica	78
5.2 Seleção do software e aquisição/organização dos produtos de sensoriamento remoto e dos produtos cartográficos.....	78
5.3 Experimentos	80
5.3.1 Experimento 1.....	81
5.3.2 Experimento 2.....	86
5.3.3 Experimento 3.....	95
6 RESULTADOS.....	102
6.1 Experimento 1	102
6.2 Experimento 2	113
6.2.1 Seleção da janela móvel.....	113
6.2.2 Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo	116
6.3 Experimento 3	128
6.3.1 Classificação das formas de relevo por meio de janelas múltiplas	128
6.3.2 Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo	130
6.3.3 Validação dos resultados	132
6. CONCLUSÃO	146

REFERÊNCIAS.....149

APÊNDICE A167

ANEXO A176

ANEXO B.....177

1 INTRODUÇÃO

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 e VERSTAPPEN, 1988).

A cartografia geomorfológica constitui um importante instrumento na espacialização dos fatos geomorfológicos, permitindo representar a gênese das formas do relevo e suas relações com a estrutura e processos, bem como com a própria dinâmica dos processos, considerando suas particularidades (CASSETI, 2005).

No entanto, representar cartograficamente o relevo de maneira sistemática não é uma tarefa simples devido à complexidade das informações que devem ser necessariamente relatadas. Desde o início, as fotografias aéreas foram amplamente utilizadas em procedimentos monoscópicos e estereoscópicos de interpretação visual, nos quais propriedades do relevo foram analisadas manualmente ao longo de décadas, majoritariamente de forma qualitativa. Posteriormente, esses métodos abarcaram uma derivação de mapas topográficos, mas ainda embasados na análise manual.

Os métodos mais recentes de cartografia geomorfológica envolvem a análise digital do relevo e automatização do processo de classificação. Seu desenvolvimento teve início quando Evans (1972) introduziu pela primeira vez um sistema integrado de geomorfometria, mas apenas nos últimos anos, com a evolução da capacidade de processamento dos computadores e difusão dos aplicativos de Sistema de Informações Geográficas (SIG), esses métodos se consolidaram. Um importante progresso foi alcançado na melhoria da precisão altimétrica com o desenvolvimento de novos algoritmos e novos softwares para calcular atributos do terreno.

Muitos produtos de sensoriamento remoto (imagens, *Shuttle Radar Topography Mission* - SRTM, LIDAR, etc.) foram introduzidos nos métodos de análise digital ao longo dos anos e integrados aos estudos geomorfológicos. Trata-se de uma tendência viabilizada pela elevada disponibilidade de dados, muitas vezes gratuitos e com ampla cobertura espacial (BETTÚ, 2012). Uma ampla gama de novos sensores,

aerotransportados e orbitais, adquire dados nas faixas espectrais do visível e de micro-ondas. 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 (CAMARGO, 2008).

Além da evolução tecnológica, o desenvolvimento das propostas de análise digital e automatização das classificações do relevo em ambiente computacional foi motivado pelo interesse em superar a subjetividade relativa às interpretações realizadas manualmente, extraindo informações de forma quantitativa (KLINGSEISEN et. al, 2008). Essa preocupação na quantificação dos dados advém do fato de haver grande dependência entre a precisão na delimitação das unidades de relevo e a experiência do fotointérprete. As classificações automatizadas ou semiautomatizadas pretendem superar esse grau de subjetividade, extraindo informações de uma forma quantitativa, sistemática e conseqüentemente, tornando o mapeamento mais reproduzível (VENTURA e IRVIN, 2000).

Camargo (2008) enfatiza a importância da realização de inventários geomorfológicos rápidos, precisos e sistematizados para a gestão e planejamento, sobretudo em países em desenvolvimento e com grandes extensões territoriais, tal como o Brasil, onde os mapas existentes se restringem a poucos inventários sistemáticos como o Projeto RADAMBRASIL (BRASIL, 1983) na escala 1:1.000.000, o único com abrangência nacional, o mapeamento do Estado da Bahia realizado pela Ceplab (1980) na escala 1:1.000.000 e os mapeamentos do Estado de São Paulo elaborados pelo IPT (1981) na escala 1:1.000.000 e por Ross e Moroz (1997) na escala 1:500.000.

Informações sobre formas de relevo são essenciais para estudos de avaliação do terreno, estudos de adequação, estudos de erosão, de riscos e vários campos do planejamento regional ou inventários de uso da terra (DRÄGUT; BLASCHKE, 2006). Fica evidente a necessidade de uma atualização e elaboração de novos mapas geomorfológicos para o preenchimento dessa lacuna. Para isso, é fundamental o desenvolvimento de novos métodos para a classificação do relevo que sejam menos subjetivos, mais precisos e, conseqüentemente, sejam adaptáveis para aplicações específicas.

Nos últimos anos, alguns trabalhos focados na análise geomorfométrica digital têm sido desenvolvidos no Brasil, como Valeriano (2002, 2003, 2008), Camargo (2008); Grohmann (2008), Muñoz (2009), Robaina et al. (2010), Vasconcelos et al. (2012) e Bettú (2012). No entanto, a maior parte desses estudos não visa a classificação automatizada do relevo, mas sim a análise de parâmetros geomorfométricos obtidos em meio digital para caracterizar o relevo. Há assim um longo caminho a ser explorado e muitas ferramentas e métodos a serem estudados, testados e aprimorados para o relevo brasileiro.

Nesse contexto, esse trabalho investiga e analisa parâmetros e métodos de classificação automatizada do relevo a partir de um modelo digital de elevação. Propõem-se ainda uma metodologia de classificação de padrões de formas semelhantes do relevo a partir dos parâmetros de declividade, amplitude e perfil do relevo. Primeiramente, são apresentados como resultados produtos intermediários, obtidos através de técnicas de visualização de modelos digitais de elevação que auxiliam no reconhecimento prévio da área estudada. Os resultados finais englobam mapas de classificação do relevo que retratam as unidades com padrões de formas semelhantes em escalas entre 1:100.000 e 1:50.000. De acordo com IBGE (2009), esses mapas se enquadram na categoria de mapas geomorfológicos básicos e fornecem uma visão geral da geomorfologia da área, podendo servir de base para diversos outros mapeamentos como geotécnico, geológico, pedológico, zoneamento geoambiental e geomorfológico de detalhe.

As áreas de estudo adotadas neste trabalho foram o planalto de Poços de Caldas, uma área de relevo montanhoso localizada no sul do estado de Minas Gerais, e a bacia do rio Corumbataí, uma área de relevo suave localizada nos limites entre a Depressão Periférica Paulista e as Cuestas arenito-basálticas. Essas áreas foram selecionadas pelos relevos contrastantes, além da disponibilidade de dados e conhecimento prévio da autora, item primordial para a realização de uma classificação automatizada do relevo.

2 HIPÓTESE E OBJETIVOS

A geomorfometria constitui uma das principais ferramentas para o mapeamento geomorfológico. A altimetria, declividade, densidade, textura, entre outros itens associados à mensuração do relevo são elementos essenciais para a interpretação e classificação do terreno. Considerando a diversidade de formas, processos e materiais associados ao relevo, a morfometria diminui a subjetividade da análise, possibilitando um aprimoramento dos resultados nas compartimentações geomorfológicas.

Contudo, parâmetros morfométricos ainda são predominantemente utilizados para a caracterização das unidades do relevo e não para a sua identificação e delimitação em si. Atualmente, com os avanços tecnológicos no desenvolvimento de modelos digitais de elevação (MDE) e dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), novos produtos e ferramentas têm surgido e estes podem ser a chave para uma abordagem paramétrica quantitativa que viabiliza a automatização das classificações do relevo em ambiente computacional.

A partir dos aspectos apresentados, a seguinte hipótese de trabalho foi formulada para o desenvolvimento da pesquisa:

É possível compartimentar de forma eficiente o relevo em unidades com padrões de formas semelhantes a partir do uso de um MDE e de um método automatizado baseado em parâmetros geomorfométricos.

Para verificar a hipótese formulada, o principal objetivo da pesquisa foi propor um método de classificação automatizada do relevo a partir de um modelo digital de elevação, parâmetros e ferramentas que possibilitem uma abordagem quantitativa. Foram gerados mapas de unidades de padrões de formas semelhantes do relevo por meio de dados em escalas compatíveis a 1:100.000 (SRTM de 90 metros de resolução) e 1:50.000 (SRTM de 30 metros de resolução) que servem de base para mapeamentos geotécnicos, geológicos, geomorfológicos de detalhe, zoneamentos geoambientais, entre outros.

Para alcançar o objetivo principal, alguns objetivos específicos foram definidos:

1. Investigar e avaliar técnicas de visualização de modelos digitais de elevação para o realce de elementos de análise do relevo que auxiliem no reconhecimento da área de estudo e no processo de compartimentação do relevo;

2. Adaptar, aplicar e avaliar uma metodologia de classificação de unidades de padrões de formas semelhantes de relevo baseada nos parâmetros de declividade, amplitude e perfil de relevo, utilizando um MDE derivado de dados SRTM com resolução de 90 metros;

3. Propor, aplicar e avaliar uma evolução na metodologia automatizada de classificação de unidades de padrões de formas semelhantes do relevo a partir do emprego de janelas moveis personalizadas, utilizando um MDE derivado de dados SRTM com resolução de 30 metros.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Duas áreas de estudo foram adotadas nesse trabalho, sendo o planalto de Poços de Caldas - MG e a bacia do rio Corumbataí - SP. Essas áreas, selecionadas pelos relevos contrastantes, pela disponibilidade de dados e conhecimento prévio da autora, têm suas principais características descritas a seguir.

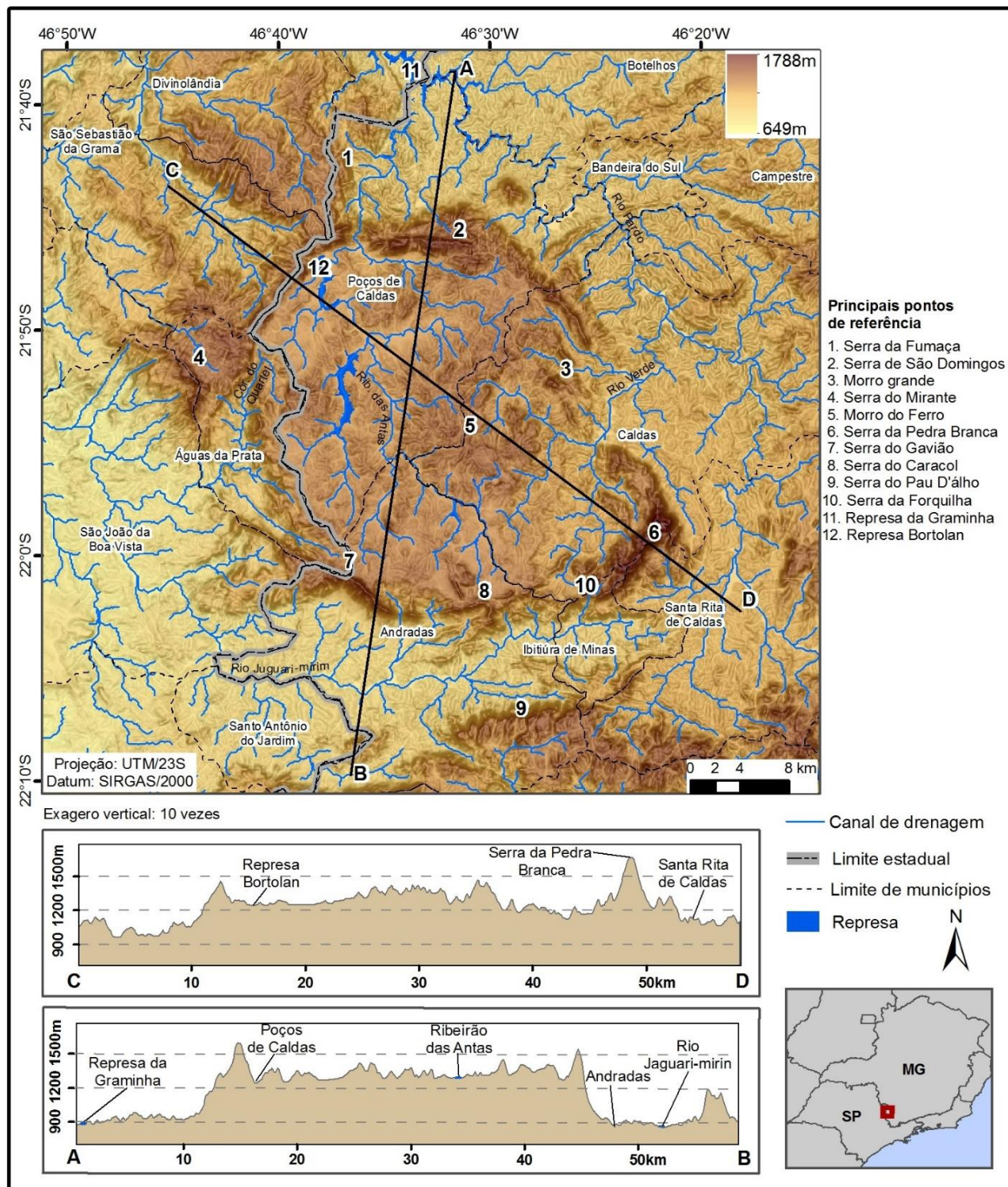
3.1. Planalto de Poços de Caldas

A região do planalto de Poços de Caldas situa-se na divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo, no divisor d'águas entre os rios Grande, Pardo e Moji-Guaçu e destaca-se como o maior complexo alcalino do Brasil. Ocupando uma área de cerca de 800 km², o planalto abrange partes dos municípios de Poços de Caldas, Caldas, Andradas e Águas da Prata (BRASIL, 1979), como pode ser observado na Figura 1.

Enquadrado nas longitudes de 46° e 47° W e nas latitudes de 21° e 22° S, o clima do planalto pode ser enquadrado no grupo C (mesotérmico), subtipo Cwb, ou seja, clima mesotérmico de inverno seco, com verões brandos e estação chuvosa no verão (KOPPEN, 1948). De acordo com Brasil (1979), neste subtipo de clima, também denominado de “tropical de altitude”, a temperatura média anual é em torno dos 19,9°C e a pluviosidade fica entre 1300 mm e 1700 mm.

A área estudada localiza-se na borda ocidental da Província da Mantiqueira, correspondendo à região sul da Faixa Brasília, em contato com os extremos orientais da bacia sedimentar do Paraná, formando um conjunto morfoestrutural perfeitamente caracterizado (CHRISTOFOLETTI, 1973). Dentro das divisões geomorfológicas da região Sudeste do Brasil, a região estudada está inserida na província do planalto Atlântico, que caracteriza-se como uma região de terras altas, constituída predominantemente por rochas cristalinas, cortadas por intrusivas básicas e alcalinas mesozóicas e terciárias (ALMEIDA, 1964; BRASIL, 1979; IPT, 1981).

Figura 1. Localização da área do Planalto de Poços de Caldas



Fonte: Elaborado pelo autor.

O planalto de Poços de Caldas situa-se na zona do Planalto Sul de Minas que está subdividida em três subzonas: a superfície do Alto Rio Grande, o planalto de São Pedro de Caldas e planalto de Poços de Caldas (BRASIL, 1979). A superfície do Alto Rio Grande engloba uma ampla superfície de relevo ondulado, com altitudes variando em torno de 900 metros onde se salientam cristas de cotas um pouco superiores a 1000 metros. Já o planalto de São Pedro de Caldas é descrito por Brasil (1979) com uma área com grandes formas de topos convexos que apresentam desníveis da ordem de 80 a 90m em relação aos fundos de vales e onde ocorrem cristas que se destacam dos relevos mamelonares rebaixados.

Como pode ser observado na Figura 2, ao norte da área ocorre também a zona Cristalina do Norte, que mantém um relevo de transição entre as terras altas do planalto do Sul de Minas e da Mantiqueira para a região rebaixada da depressão Periférica Paulista e é subdividida em duas subzonas: a de Amparo e a de São José do Rio Pardo. A subzona de Amparo possui duas áreas de altitudes diferentes: a leste, serras que se nivelam à superfície Japi (1.300m), dando continuidade aos terrenos elevados do planalto de Campos do Jordão e a oeste, colinas rebaixadas com altitudes que se nivelam àquelas da depressão Periférica Paulista. Já a subzona de São José do Rio Pardo apresenta um relevo mais movimentado, sobretudo a noroeste de Poços de Caldas, onde a tectônica é responsável pela elevação da superfície a níveis de 1.550m (BRASIL, 1979).

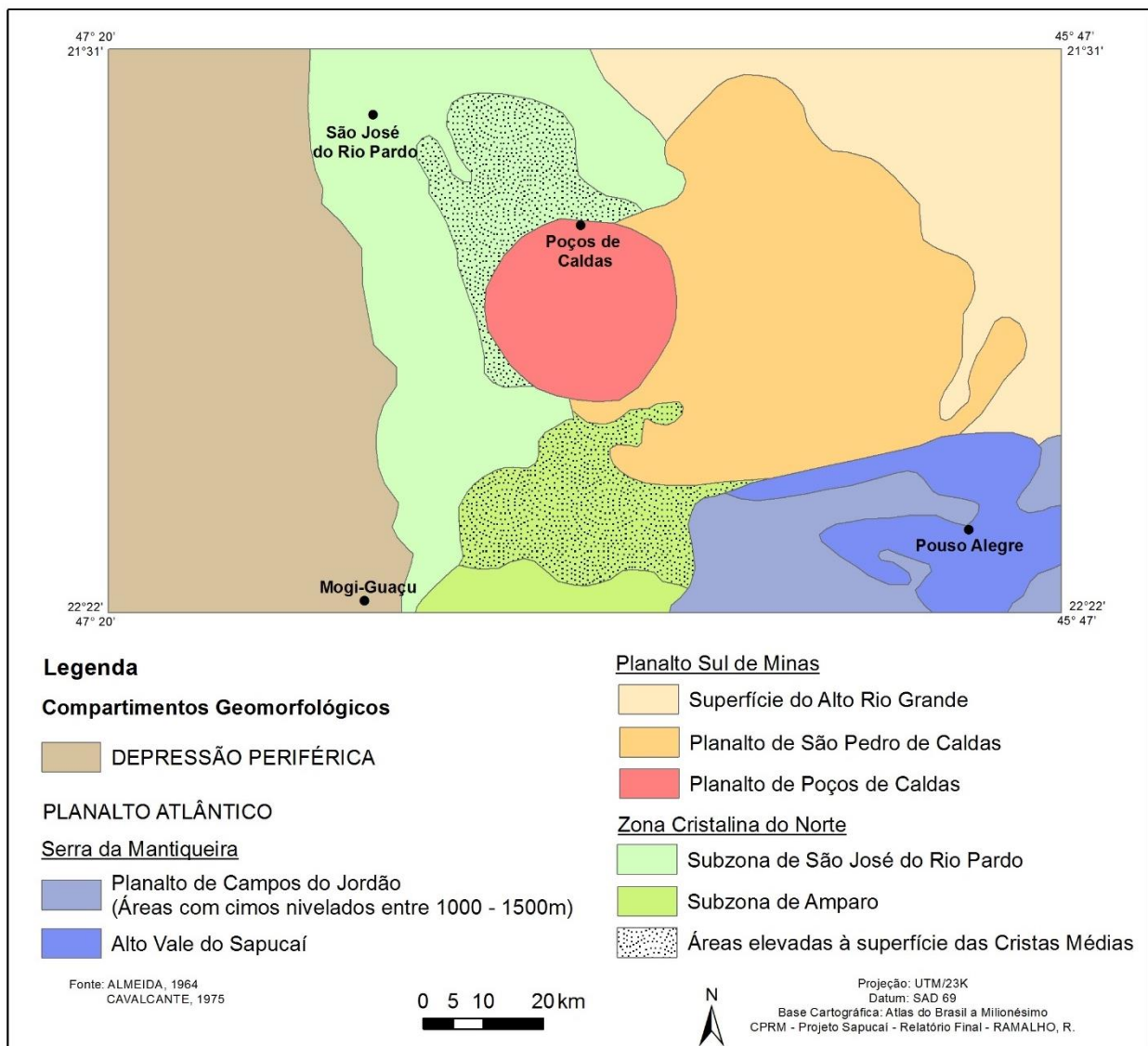
A subzona do planalto de Poços de Caldas emerge na paisagem com um anel de cristas que moldura uma zona rebaixada no interior. Também denominado dique anelar, esse anel está salientado de 300 a 500 m acima do relevo cristalino que o rodeia, com uma forma ligeiramente elíptica e eixo maior de 35 quilômetros no sentido NE-SW e o menor de 30 quilômetros no sentido NW-SE. No centro desse dique anelar desenvolve-se uma topografia de morros e colinas, cujos desníveis locais raramente ultrapassam 150 m. As serras que envolvem o planalto de Poços de Caldas alcançam 1630 m no morro do Cristo Redentor, enquanto que o interior se nivela em aproximadamente 1300 m (BRASIL, 1979).

O dique anelar é saliente na topografia em três quadrantes: norte, oeste e sul. De acordo com Liporaci (1994), são constituintes do dique anelar: a NO, Serra de Poços de Caldas (1575 m), ao norte tem-se a Serra de São Domingos (1635 m) e o pico do Cristo

Redentor (1637 m), a NE localizam-se a Serra do Selado (1500 m) e do Serrote Maranhão (1519 m), a SO estão a Serra do Gavião (1663 m) e do Caracol (1557m).

Christofoletti (1972) caracteriza superficialmente o relevo do interior planaltino. O autor identifica uma área de topografia movimentada na porção oriental, perfeitamente distinta das demais áreas planaltinas. Esta porção limita-se ao sul pelo Rio das Antas, segue na direção SE-NW e finaliza um pouco ao norte da confluência do córrego Tamanduá com o Rio das Antas. Apresenta níveis altimétricos elevados, em torno de 1400 m e vertentes cujas declividades comumente atingem valores superiores a 20°. A

Figura 2. Mapa de compartimentos geomorfológicos do planalto de Poços de Caldas.



Fonte: Adaptado de BRASIL (1979).

drenagem, embora condicionada por linhas tectônicas, apresenta vales encaixados com rupturas de declives e presenças de várzeas estreitas e pouco alongadas.

No restante do interior do planalto, Christofoletti (1972) descreve uma topografia menos movimentada, onde as declividades das vertentes tornam-se mais suaves e percebe-se a presença constante de topos aplainados e largos. Os rios, com declividades de baixo valor, apresentam inúmeros meandros e por vezes, amplas várzeas.

O planalto de Poços de Caldas é drenado por três bacias: a do ribeirão das Antas, a do rio Verde e a do Córrego do Quartel. As três bacias são partes integrantes da bacia hidrográfica do rio Grande, pertencente ao grande sistema hidrográfico do rio Paraná. Segundo Christofoletti (1970) a bacia do rio das Antas constitui a maior e principal bacia hidrográfica deste planalto, abrangendo toda sua porção centro-ocidental e drenando uma área de litologia variada de 422,96 km², o que representa 70 % da área do planalto. O sistema de drenagem dessa bacia inicia-se ao sul do planalto nas escarpas interiores do dique meridional a uma altitude de 1400 metros e percorre 55 km dentro do planalto onde vários córregos se unem para formar o ribeirão das Antas, principal curso de água local. O ribeirão sai do planalto ao norte a uma altitude de 1180 metros, em um local denominado de Cascata das Antas e direciona-se a Represa da Graminha, onde se torna afluente do Rio Pardo (CHRISTOFELETTI, 1970).

De menor abrangência, a bacia do rio Verde drena a parte leste do planalto e seu rio principal nasce na Serra da Forquilha. Seguindo rumo nordeste, o rio Verde também deságua fora do planalto e aflui no Rio Pardo. Já bacia do córrego do Quartel drena um pequeno setor a oeste do planalto. Seu rio principal nasce entre a Serra do Marinho e a Serra de Poços de Caldas, segue em direção a Águas da Prata e deságua no Córrego da Platina, próximo à área urbana de Águas da Prata (CHRISTOFELETTI, 1970; LEONARDI, 2007).

No geral, a drenagem da área apresenta alta densidade e podem ser destacados três padrões, sendo que o principal é do tipo dendrítico a sub-dendrítico. Aparecem em ocorrências mais restritas os padrões treliça em falha e anelar. No entanto, é relevante enfatizar que na maior parte dos casos, os segmentos de drenagem não apresentam os padrões básicos, mas sim modificados pela ação de eventos tectônicos (falhamentos) que definem anomalias locais, como inflexões, cotovelos e capturas (MORAES, 2007).

Pela classificação de Koppen, cuja fundamentação está nos valores médios da temperatura do ar e da precipitação pluviométrica, o clima da área estudada pode ser enquadrado no grupo C (mesotérmico), subtipos Cwb e Cwa, sendo ambos climas mesotérmicos de inverno seco e estação chuvosa no verão. A diferença entre eles está no verão que é classificado como brando no subtipo Cwb e quente no subtipo Cwa (BRASIL, 1979).

As terras baixas na região de Águas da Prata apresentam o clima do subtipo Cwa e o clima gradado para o Cwb aproximadamente na linha divisória dos estados de São Paulo e Minas Gerais. O índice pluviométrico nos dois subtipos de clima varia entre 1100mm e 1700mm e a estação seca estende-se de final de abril a setembro. O mês mais chuvoso, em geral, é janeiro, quando o total de chuvas pode atingir 10 vezes mais que julho. A temperatura média no inverno é de 18°C e no verão varia entre 22°C e 24°C (BRASIL, 1979).

Segundo Moraes (2007), o Planalto de Poços de Caldas é limitado a SE e NE por um conjunto de serras compostas por rochas de idade pré-cambriana (Serra da Mantiqueira) que constitui uma parte do cinturão Ribeira, de idade proterozóica, em que as altitudes alcançam 2000m. A oeste, o planalto é limitado pela depressão da Bacia do Paraná, com a ocorrência de uma faixa com padrão N-S formado por gnaisses, migmatitos e granitóides de idade pré-cambriana e altitude intermediária, conhecida como a porção norte cristalina do estado de São Paulo (SCHORSCHER e SHEA, 1991).

O planalto retrata um exemplo do modelado estrutural dômico com diques anelares (devido à ascensão do magma nefelínico na periferia do maciço e de fendas circulares) e aparece como uma unidade individualizada (delimitado por um anel quase perfeito), formando um complexo de rochas efusivas e intrusivas, que representa a maior ocorrência alcalina do país (LEONARDI, 2007).

Moraes (2007) destaca que a intrusão de rochas alcalinas rompeu e reorganizou antigas litologias, havendo o contato de rochas alcalinas com o embasamento composto por rochas graníticas, gnáissicas e migmatíticas. Por vezes, há o contato das alcalinas com materiais da antiga cobertura sedimentar da Bacia do Paraná (ELLERT, 1959; BJORNBERG, 1959). Nas vizinhanças das cidades de Águas da Prata, e em áreas

isoladas do interior do planalto ocorre ainda o arenito Botucatu que fora afetado pelas intrusões.

O primeiro trabalho de cunho geológico interpretativo sobre o planalto de Poços de Caldas foi realizado em 1887 por Derby, que reconheceu a natureza vulcânica da região. Posteriormente, Machado (1888), Barbosa (1934, 1936, 1948), Guimarães (1948) e Branco (1956) apresentaram descrições dos tipos litológicos, estudos petrográficos, além de ressaltar a relevância econômica das jazidas minerais da área.

Mas foi Ellert (1959) quem descreveu detalhadamente as principais litologias, elaborou um mapa geológico da área, apresentou um relato dos mecanismos de intrusão e o primeiro modelo de origem e evolução do planalto – o Modelo de Cratera. Este é o modelo mais aceito até os dias de hoje e foi reiterado por Björneberg (1959), Fraekel et al. (1985) e Ulbrich (1984), com pequenas alterações em algumas fases. Acredita-se que o processo iniciou-se durante o Mesozóico, provavelmente Cretáceo Inferior (130 a 85 Ma.), quando ocorreu a formação das caldeiras vulcânicas na região (ELLERT, 1959). A estrutura interna do complexo foi determinada pelo padrão de estruturas circulares menores (subcaldeiras) que foram truncadas umas pelas outras de acordo com suas idades relativas (ALMEIDA-FILHO e PARADELLA, 1977; VALETON et al., 1997).

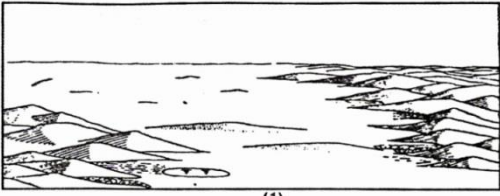
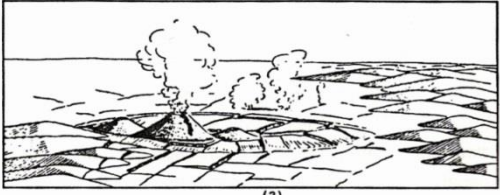
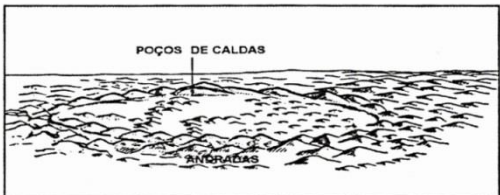
O vulcanismo no complexo de Poços de Caldas teve longa duração (cerca de 30 Ma.) se comparada com os vulcões modernos, com duração de 2 – 3 Ma. (ULBRICH, 1984) assim, são visíveis alguns diques menores e estruturas circulares formados após a subsidência da caldeira principal pela continuada intrusão de nefelina sienitos (MORAES, 2007). O modelo evolutivo do complexo de Poços de Caldas proposto por Ellert (1959) é composto de seis etapas principais (modificado por SCHORSCHER e SHEA, 1991) como é descrito e ilustrado no Quadro 1.

Segundo Ellert (1959), os indícios de que a atividade vulcânica foi precedida ou acompanhada por levantamentos escalonados de blocos gnáissicos após a deposição dos sedimentos de arenitos da Bacia Paraná (Fm. Aquidauana) são indiretos e fundamentam-se tanto em observações geomorfológicas como em deduções geológicas.

Para Fraenkel et al.(1985), houve ainda uma segunda etapa de soerguimento com invasão de tinguaítos e foiaítos e para Ulbrich (1984) não há domeamento inicial, mas sim, a presença de diques de diabásio da Formação Serra Geral, seguida da intrusão de

nefelina sienitos, fonólitos e pseudoleucitas, tanto no interior como nas bordas do maciço, gerando os diques anelares e posterior alteração hidrotermal e brechamentos tardios resultantes da última invasão de fonólitos.

Quadro 1. Sequência de eventos geológicos conforme modelo de cratera proposto por Ellert (1959).

 (1)	1) Início do processo de intrusão causando elevação do nível de base, distensão, fraturamento e erosão;
 (2)	2) Atuação do vulcanismo (extrusivo) com a formação de fonólitos e vulcanoclásticas;
 (3)	3) Subsidência da caldeira; 4) Intrusões de nefelínicas: tinguaítos, fonólitos, nefelina-sienitos, formando estruturas circulares menores e diques anelares;
 POÇOS DE CALDAS ANÓCLITOS	5) Continuação do processo de intrusão e fraturamento; 6) Intrusão de lujaunitos, chibinitos e foiaítos.

Fonte: Ellert (1959) modificado por Schorscher e Shea (1991)

Motoki e Oliveira (1987), Motoki et al (1988) e Motoki e Vargas (1991) reestudaram o modo de ocorrência das rochas sedimentares do maciço e, baseados em Almeida (1964), sugeriram que a erosão diferencial gerou as formas de relevo hoje observadas. Esse modelo de origem e evolução do planalto de Poços de Caldas recebeu o nome de Modelo de Corpo Intrusivo Erodido. Os autores discordavam de Ellert (1959) ao afirmarem que o que aflora hoje é a parte superior de um corpo intrusivo raso; a exposição atual do referido complexo não pode representar um "vulcão" ou uma "caldeira", mas sim, um corpo intrusivo de "*magmatic stoping*".

No planalto de Poços de Caldas ocorrem inúmeros tipos litológicos de filiação alcalina, sendo predominantemente rochas alcalinas efusivas e intrusivas da família dos nefelinas sienitos (tinguaítos, fonólitos, foiaítos) na forma de um corpo intrusivo de idade mesozóica-cenozóica.

Ellert (1959) identificou 4 grupos de litotipos:

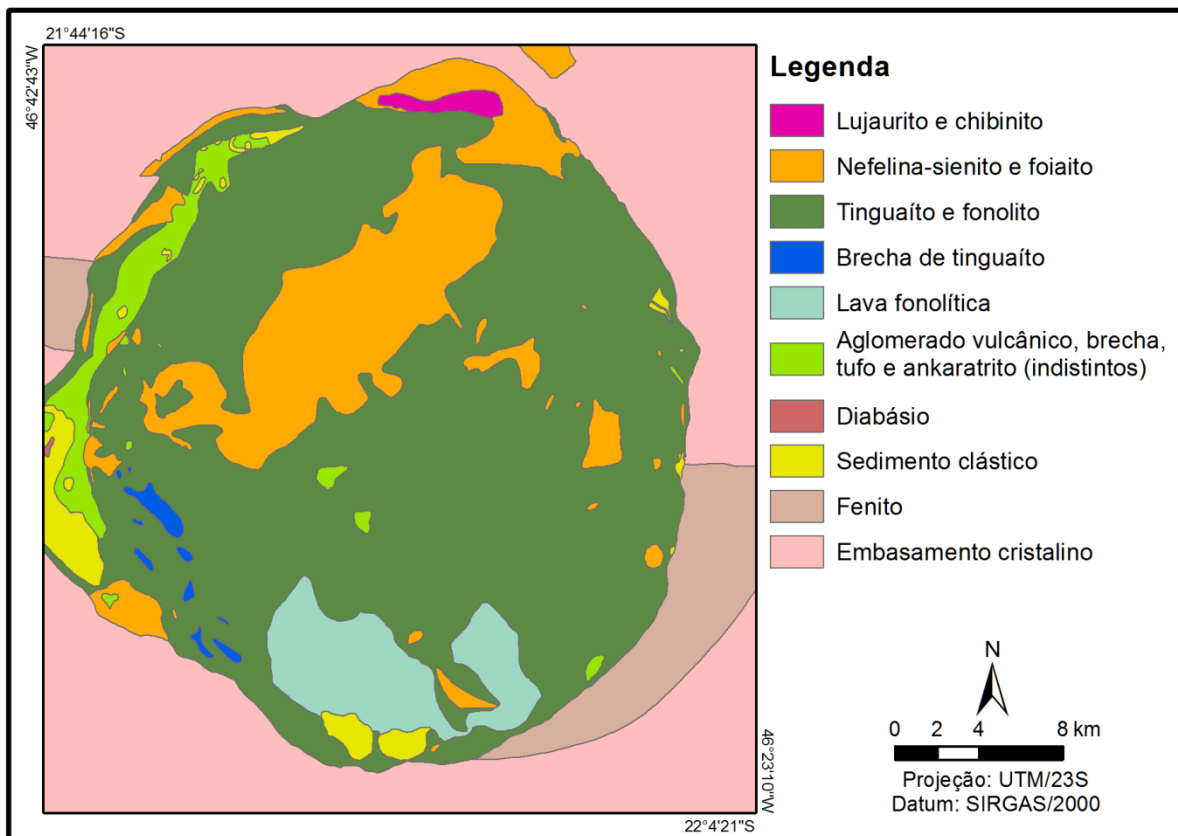
- 1) Brechas, Tufos e Aglomerados;
- 2) Rochas Efusivas e Hipoabissais (Tinguaíto e Fonolitos);
- 3) Rochas Plutônicas (Nefelina Sienitos, Lujauritos e Chibinitos);
- 4) Rochas Potássicas (associadas a processos metassomáticos).

Datações realizadas por Amaral et al. (1967) e Hasui (1968), pelo método K/Ar de algumas rochas alcalinas da região, mostram idade de, aproximadamente, 80 a 63 Ma.

Segundo Valetton et al. (1997) predominam as rochas plutônicas de granulação fina e rochas do grupo das nefelina-sienitos leucocráticas subvulcânicas (tinguaíto), incluindo rochas enriquecidas por potássio, que cobrem 78% da superfície da área anelar. Sienitos de granulação média ocupam 13,5%, fonolitos 5% e rochas piroclásticas 3%. Outros tipos de nefelina sienitos perfazem 0,5%, sendo o lujaurito e chibinito. A borda do maciço alcalino é formada na maior parte pelo dique anelar de tinguaíto. Os remanescentes da atividade vulcânica correspondem a lavas de ankaratrito, freqüentemente formando aglomerados, tufos e brechas. Esses tipos encontram-se principalmente na região noroeste do complexo (LEONARDI, 2007). O mapa geológico do planalto de Poços de Caldas pode ser observado na Figura 3.

Os solos da região têm suas características condicionadas, principalmente, aos tipos litológicos sobre os quais atuaram os processos pedogenéticos. De acordo com Brasil (1979), na área ocorrem latossolos vermelho-amarelo álico e vermelho escuro distróficos, podzólicos vermelho-amarelo e cambissolos háplicos e distróficos. Predominam os solos com horizonte B latossólico, dominando o latossolo vermelho-amarelo álico (alta saturação de alumínio) e baixa saturação em bases, apresentando graves problemas para o desenvolvimento da agricultura, devido aos baixos teores de nutrientes. Este solo caracteriza-se pela grande capacidade de infiltração e permeabilidade, porém, com elevado grau de acidez.

Figura 3. Mapa geológico do planalto de Poços de Caldas.



Fonte: Adaptado de Ellert (1959)

No maciço alcalino, em geral, o solo é argiloso, com pequenas ocorrências de arenito, e intercalado com jazidas consideráveis de bauxita e argila refratárias. Os litotipos vulcânicos originam solos com texturas diferenciadas, como latossolo vermelho-escuro, que difere dos latossolos vermelho-amarelo, por apresentarem textura mais argilosa e cores mais avermelhadas. Em decorrência de ambiente oxidante nessa região, tais solos são profundos, muito drenados e ocorrem em manchas de extensão significativas, limitadas pelas faixas de lateritas, decorrentes do maior teor de alumina. Nesse caso, o relevo é geralmente mais suave, favorecendo a lixiviação e o empobrecimento do solo. Nas faixas de podzólicos e latossolos avermelhados, o relevo tende a ser mais movimentado e, portanto mais sujeito a focos erosivos, dificultando seu bom aproveitamento agrícola (PREFEITURA DE POÇOS DE CALDAS, 2006).

Além desses, também ocorrem, de forma restrita, os solos argilosos de cor escura, em decorrência da matéria orgânica acumulada, localizados nos fundos dos vales, nas zonas embrejadas.

Carvalho (2007) afirma que a predominância dos latossolos, formados *in situ*, por efeito do intemperismo, é característico de regimes pluviométricos torrenciais com duas estações bem marcadas. Esse fenômeno é também responsável pelas extensas formações superficiais de bauxita na área, favorecido pela ausência de quartzo das rochas sieníticas.

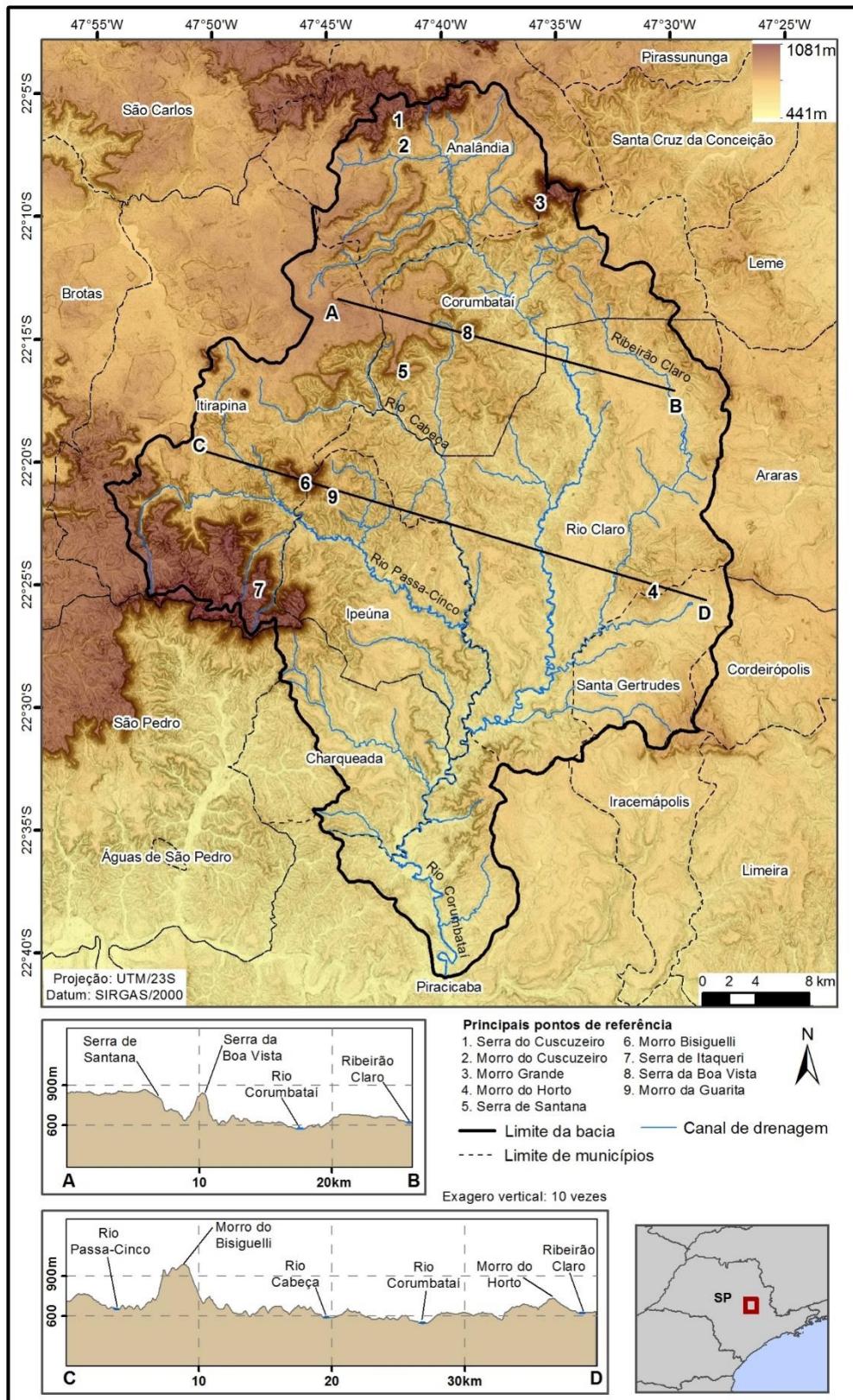
3.2 Bacia do rio Corumbataí

A bacia do rio Corumbataí situa-se na porção centro-leste do estado de São Paulo e corresponde a uma sub-bacia de margem direita do rio Piracicaba. Enquadrada entre as coordenadas 47° 55' e 47° 27' W e 22° 05' e 22° 41' S e ocupando uma área de 1.715 km², a bacia abrange parte dos municípios de Rio Claro, Analândia, Corumbataí, Itirapina, Ipeúna, Charqueada, Santa Gertrudes e Piracicaba, como pode ser observado na Figura 4.

O rio Corumbataí tem uma extensão aproximada de 120 km, nascendo na cota 860m em Analândia e desaguando no rio Piracicaba, a 470m de altitude, ponto de altimetria mais baixa da bacia. Sua vazão média anual é de 22 m³/s e a vazão mínima, de 5 m³/s. No alto curso, o rio Corumbataí é encachoeirado e corre em vales estreitos e profundos, enquanto que já na cidade de Rio Claro, no médio curso, o rio apresenta-se em declive pequeno, de 2 m/km e corre em vales abertos, com muitas curvas e meandros (CEAPLA, 2000; ZAINÉ, 1994). Seus principais afluentes são os rios Cabeça, Passa-Cinco e o Ribeirão Claro.

De acordo com Ab'Saber (1969), o rio Corumbataí é de caráter recente-subseqüente. Etchebehere, Casado e Morales (2011) argumentam que no seu alto curso, o rio flui no rumo sudeste, apresentando um caráter obsequente em relação à escarpa que delimita as cuestas basálticas. Já nas proximidades da cidade homônima, o rio dirige-se para sudoeste, passando a ter um caráter subsequente.

Figura 4. Localização da área da bacia do rio Corumbataí.



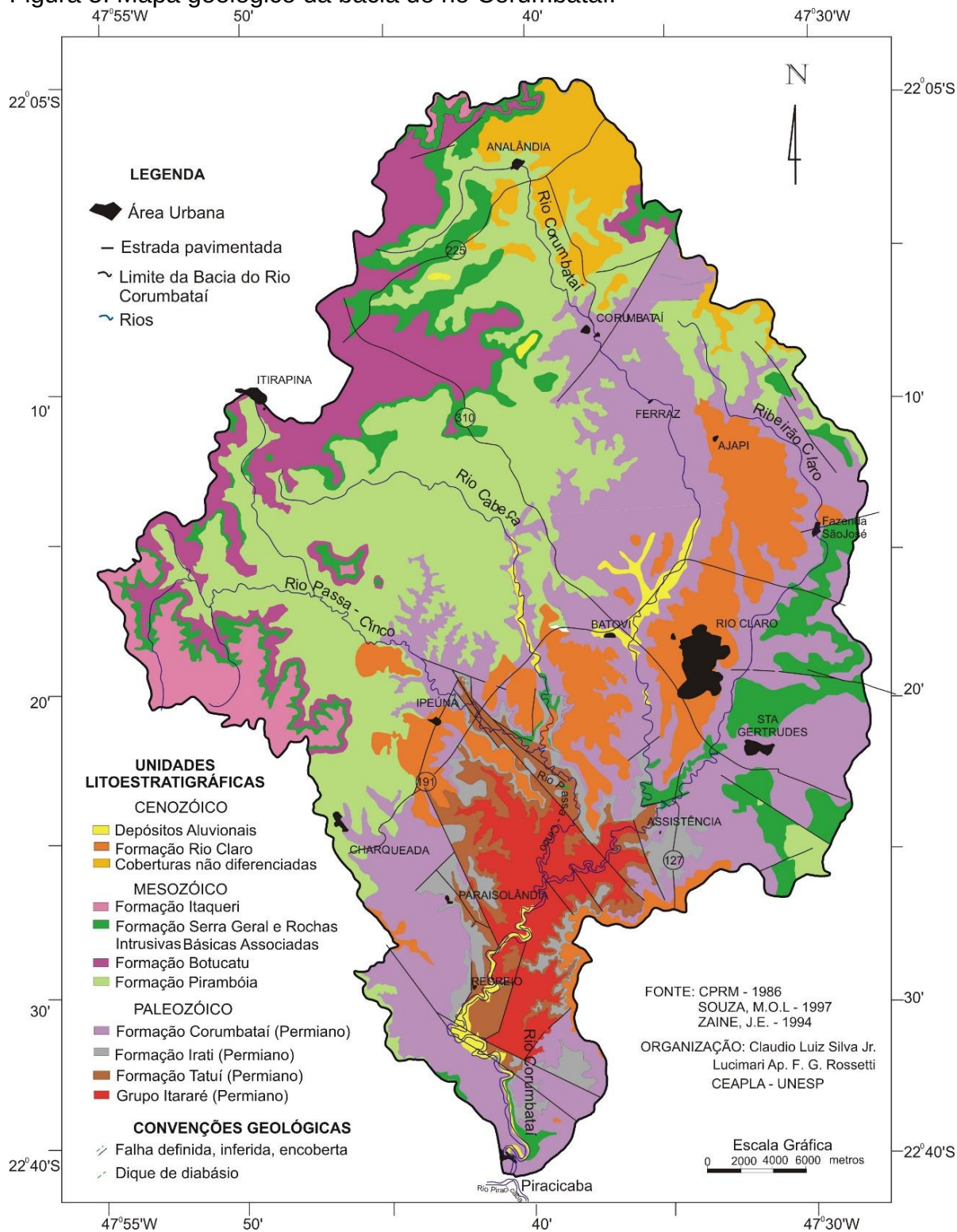
Fonte: Elaborado pelo autor.

Penteado (1976) admite um forte condicionante tectônico para a orientação deste rio, ou seja, falhamentos pós-cretácicos que afetaram a região. Segundo Almeida (1964), "o Rio Corumbataí surgiu tardiamente no cenário da evolução geomórfica da região, pois é o único da Depressão Periférica a percorrer aproximadamente 100 km no sentido de norte para sul."

A área da bacia localiza-se, geologicamente, no setor paulista do flanco nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, onde observa-se a ocorrência de rochas sedimentares e vulcânicas (ZAINE; ZAINE, 2009). A bacia do rio Corumbataí é um exemplo de bacia hidrográfica desenvolvida a partir do período Cenozóico, com cabeceiras nas cuestas da formação Serra Geral, em litologias típicas da bacia sedimentar do Paraná (KOFFLER, 1993).

O rio Corumbataí corre, desde sua nascente, na região de Analândia, até sua foz, no município de Piracicaba, sobre diversos tipos litológicos, como mostra a Figura 5. As rochas mais antigas são representadas pelo Grupo Itararé e Formação Tatuí, de idade paleozoica, que afloram nos vales dos rios Corumbataí e Passa Cinco. O grupo Passa Dois, datado da mesma era, agrega a Formação Irati, que atinge uma espessura de cerca de 25 metros na área e é constituída por uma sequência basal de folhelhos e siltitos (Membro Taquaral), e uma sequência superior, composta por um banco de calcário dolomítico, sucedido por folhelhos, pirobotuminosos, alternados com camadas de calcário, geralmente, substituídos por sílex (Membro Assistência); e a Formação Corumbataí, que ocorre de forma extensa por todo o vale do rio Corumbataí. As litologias dominantes nessa formação compreendem argilitos, siltitos e folhelhos, com intercalações de arenitos e leitos carbonáticos. A Formação Corumbataí é a principal fornecedora da matéria-prima (material lamítico) para as indústrias do polo cerâmico da região. (CEAPLA, 2000; ZAINE; ZAINE, 2009).

Figura 5. Mapa geológico da bacia do rio Corumbataí.



Fonte: Zaine; Zaine (2009).

Ocorrem também na área litologias da era Mesozoica, como o Grupo São Bento que é ser representado, da base para o topo, pelas formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral. Esse grupo mostra registros de uma sedimentação exclusivamente continental, em clima árido a semiárido e encerrada por extenso vulcanismo basáltico (ZAINÉ; ZAINÉ, 2009).

A Formação Pirambóia aflora nas regiões de Rio Claro, Ipeúna e Corumbataí em uma larga faixa acompanhando o sopé das serras, e é constituída por espessos corpos de arenitos com intercalações de finas camadas de argilitos e siltitos, localmente, com níveis conglomeráticos. A estratificação cruzada de grande e médio porte é uma estrutura característica da unidade, cuja espessura é de cerca de 150 metros na região (CEAPLA, 2000; ZAINÉ; ZAINÉ, 2009).

A Formação Botucatu, também conhecida como “arenito Botucatu”, é essencialmente composta por arenitos bem selecionados, amarelados e avermelhados, com marcantes e características estratificações cruzadas, principalmente de grande porte. Suas principais ocorrências situam-se nas serras de Santana, Itaqueri e do Cuscuzeiro e em morros testemunhos, com espessuras médias de 50 a 70 metros (CEAPLA, 2000; ZAINÉ; ZAINÉ, 2009).

A Formação Serra Geral sobrepõe-se aos arenitos desérticos da Formação Botucatu e aos arenitos flúvio-lacustres com influência eólica da Formação Pirambóia. Essa formação é constituída por basaltos que afloram no alto da serra de Itaqueri e intercalações de delgadas camadas de arenitos interderrames (SCHNEIDER et al., 1974).

Segundo IPT (1981), há ainda rochas intrusivas associadas ao vulcanismo da bacia do Paraná que são constituídas por diques e *sills* de diabásio. Essas rochas, que tem grande importância na caracterização do relevo, sustentando feições mais elevadas e atuando como nível de base na média bacia do rio Corumbataí, situam-se, principalmente, na serra de Santana; na Floresta Estadual, em Rio Claro, e nos leitos dos rios Corumbataí e Passa Cinco.

Ainda da era Mesozoica, o Grupo Bauru aparece como uma faixa de afloramentos que recobre os basaltos da Formação Serra Geral. Esse grupo está representado pela Formação Itaqueri e depósitos correlatos, datados do paleógeno. A formação é

constituída por uma alternância de bancos de arenito, lamitos e conglomerados e os afloramentos ocorrem no alto da serra de Itaqueri, a oeste-noroeste da cidade de Ipeúna (ETCHEBEHERE; CASADO; MORALES, 2011).

De acordo com Zaine e Zaine (2009), no centro-leste paulista ocorrem significativas manchas de depósitos Cenozóicos, ocupando vastas superfícies de relevo suave a aplainado. Podem ser citadas a Formação Rio Claro e depósitos correlatos do neógeno, além de terraços e aluviões do quaternário (BJÖRNBERG; LANDIM, 1966; ZAINÉ, 1994). A Formação Rio Claro é constituída predominantemente por sedimentos arenosos, com alternância de níveis sílticos a argilosos, pouco litificados, com solos profundos. Observa-se nessa unidade uma grande ocorrência de processos erosivos lineares como voçorocas de grandes dimensões, associadas às características da formação e à forma das vertentes (ZAINÉ; ZAINÉ, 2009).

Björnberg e Landim (1966) afirmam que a Formação Rio Claro foi depositada como leques aluviais, estendendo-se de paleoescarpas no sentido sudeste, o que configuraria um dos primeiros depósitos sedimentares implantados na Depressão Periférica Paulista. Em período posterior, ocorreu a implantação da atual rede de drenagem, que vem dissecando o antigo sistema de leques aluviais, cujos resquícios ocorrem nos principais interflúvios da bacia do rio Corumbataí (ETCHEBEHERE; CASADO; MORALES, 2011).

No contexto geomorfológico, segundo Almeida (1964), a área da bacia está inserida na província Depressão Periférica Paulista, nas zonas do Médio Tietê e Cuestas Basálticas. Penteado-Orellana (1981) especifica que essas cuestas formam uma linha de que delimita as bordas no Planalto Ocidental Paulista.

O desnível apresentado pela depressão em relação aos primeiros alinhamentos das escarpas arenito-basálticas, limiars ao norte, noroeste e oeste da área da bacia está entre 200 m a 300 m. Estas escarpas, niveladas entre as cotas de 800 m a 1.000 m, compõem um anfiteatro característico do setor-ocidental da Depressão Periférica onde localizam-se as cabeceiras do Rio Corumbataí e de seus afluentes: Ribeirão Claro e Passa Cinco (CEAPLA, 2000).

A paisagem regional é descrita como monótona, predominando extensas áreas suavemente onduladas, apenas interrompidas no contato das cuestas arenito-basálticas e cortadas pela rede hidrográfica com padronagem dendrítica. As vertentes

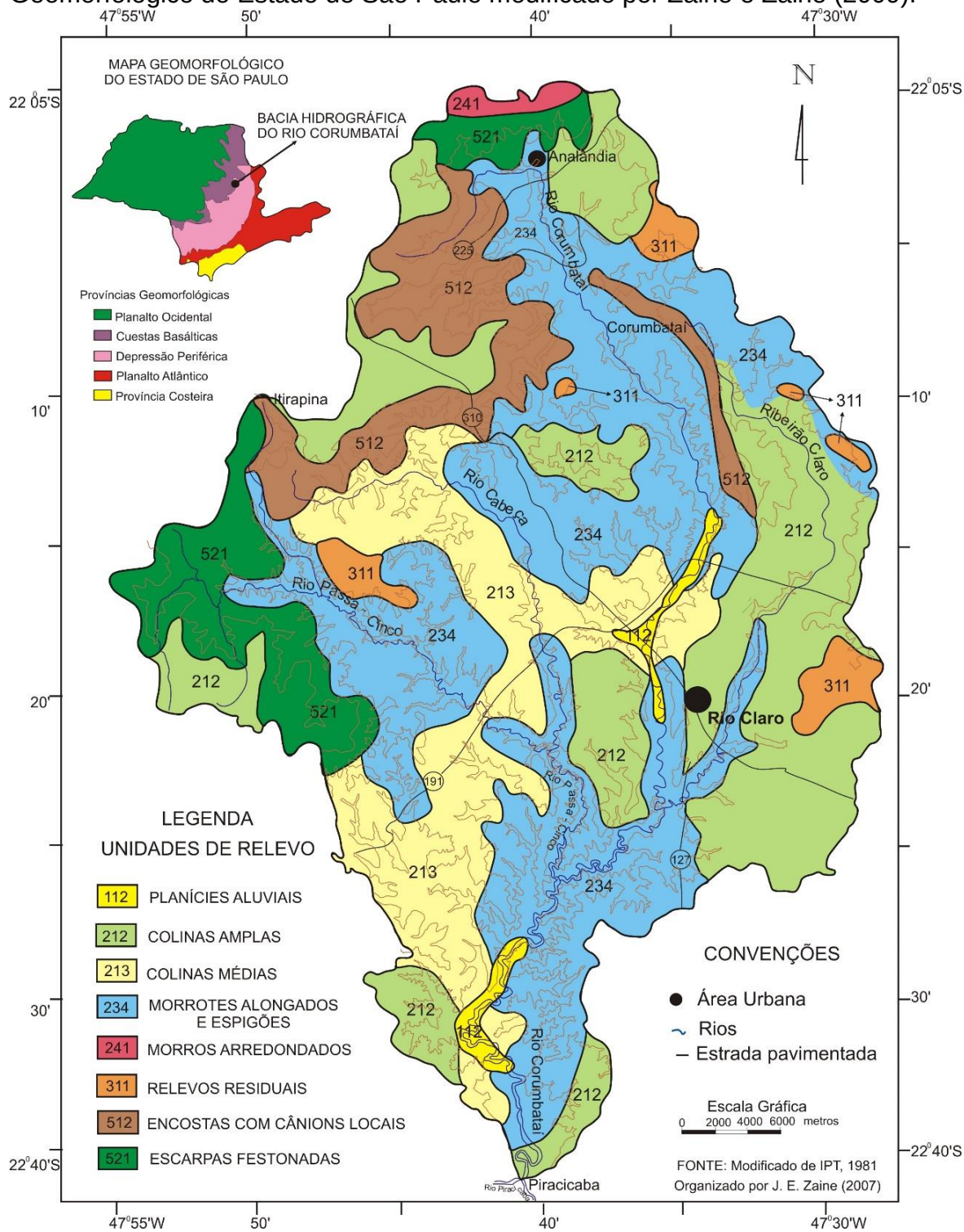
desprotegidas pelos desmatamentos, se desenvolvem de forma acelerada, contribuindo para o aprofundamento dos vales fluviais (CEAPLA, 2000). De acordo com Koffler (1994), predominam em mais de 57% da área declividades menores que 10%. Em outros 33,2% da área, ocorrem declividades entre 10 e 20% e no restante da bacia observam-se declividades superiores a 20%.

De acordo com o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo (IPT, 1981), o relevo da bacia é representado, principalmente, pelas seguintes unidades de relevo: a) morrotes alongados e espigões, b) colinas médias e amplas, em que predominam interflúvios com topos aplainados com a presença de lagoas perenes ou intermitentes, c) planícies aluviais em vales abertos. Também ocorrem d) relevos residuais sustentados por maciços básicos, representados por morros testemunhos isolados, e) escarpas festonadas (cuestas), muitas vezes com trechos escarpados e exposições de rocha desfeitas em anfiteatros de cabeceira de drenagem encaixados, f) encostas com canions locais separados por espigões. Essas unidades podem ser visualizadas na Figura 6.

Penteado (1976) observa que o relevo da área é constituído principalmente por “colinas tabuliformes de vertentes suavemente convexas e patamares de fraca inclinação dispostos entre 550 e 650m”. Trata-se de um relevo suave com interflúvios extensos e aplainados, sem divisor de águas ou linha de cumeada bem definido. A densidade de drenagem é baixa e é comum a presença de lagoas, ligadas às cabeceiras ou isoladas nos topos planos (ZAINE, 1994).

Segundo Penteado-Orellana (1981), algumas colinas desdobram-se em patamares escalonados (555 – 570m e 540 – 550m) que terminam sobre a várzea dos rios principais. Penteado-Orellana (1981) observou rupturas de declive nítidas na área, com desviveis de 10 a 15 metros e declividades mais acentuadas que marcam a presença desse nível tanto para colinas mais elevadas como para patamares inferiores (540 -550m), os quais terminam sob cobertura aluvial.

Figura 6. Unidades de relevo presentes na bacia do rio Corumbataí segundo o Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo modificado por Zaine e Zaine (2009).



Fonte: Zaine; Zaine (2009)

Essas formas levaram Penteado (1968, 1969a, 1969b, 1976) a estudar o setor centro-ocidental da Depressão Periférica, onde ela demarcou diversas superfícies de aplainamento/nivelamento de relevo, como resultado da ação de processos morfogenéticos. Penteado (1976) destaca, na área de Rio Claro, uma superfície entre 600 e 650 m, que nivelou os topos dos principais interflúvios durante uma fase seca do Quaternário, e sob a qual ocorre a Formação Rio Claro, denominando-a de Superfície Rio Claro. Essa superfície seria correlata a Superfície do Médio Tietê de Almeida (1964) e estaria incluída nas Superfícies Interplanálticas Desdobradas de Ab'Saber (1969).

Para explicar a origem dos sedimentos da Formação Rio Claro que estão associados a essa superfície, Penteado (1976) postula condicionantes tectônicos, admitindo a reativação de antigas falhas que geraram condições para a deposição aluvial a montante, aliados a fatores climáticos. A sedimentação teria ocorrido sob condições áridas a semi-áridas, alternadas com fases mais úmidas, provavelmente, em épocas mais frias do Quaternário e em fluxos torrenciais, num paleocanal que seria um antepassado do Rio Corumbataí (ZAINÉ, 1994).

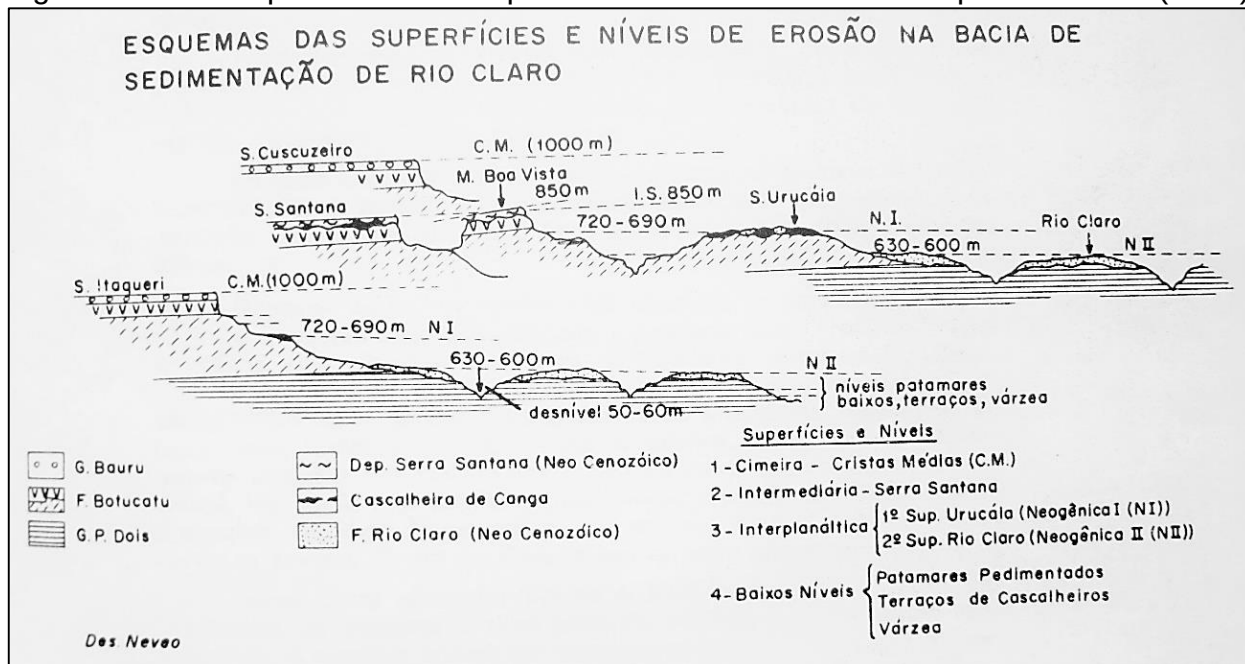
Assim, segundo Penteado (1976), a Superfície Rio Claro pode ser compreendida como um compartimento interplanáltico que passou por uma história de escavação e pediplanação e coloca-se no alto dos interflúvios marcados por colinas suavemente convexas.

Na área da bacia do rio Corumbataí, Penteado (1976) identificou também uma segunda superfície interplanáltica denominada pela autora de Superfície Urucaia. Esta encontra-se em posições mais elevadas que a Superfície Rio Claro, nivelada entre 720-690 metros, em trechos próximos ao rio Passa-cinco e ao Morro da Guarita. Há ainda outras superfícies demarcadas, como a intermediária Superfície Serra de Santana, no patamar de 850m, e as cimeiras Superfície Itaqueri e Superfície Cuscuzeiro niveladas a 1.000m. Essas elevações correspondem aos morros divisores de águas das bacias do Corumbataí e Mogi-Guaçu e salientam-se em forma de escarpas e morros testemunhos que delimitam a borda dos derrames basálticos. Os pontos mais elevados da área estão situados nas superfícies cimeiras de Itaqueri (1074m) e do Cuscuzeiro (1063m).

A Figura 7 ilustra o perfil esquemático das superfícies de erosão delimitadas por Penteado (1976) e permite observar que a descida da borda do Planalto Ocidental

Paulista se faz através de nítidos degraus estruturais até o compartimento deprimido da bacia Rio Claro.

Figura 7. Perfil esquemático das superfícies de erosão delimitadas por Penteado (1976).

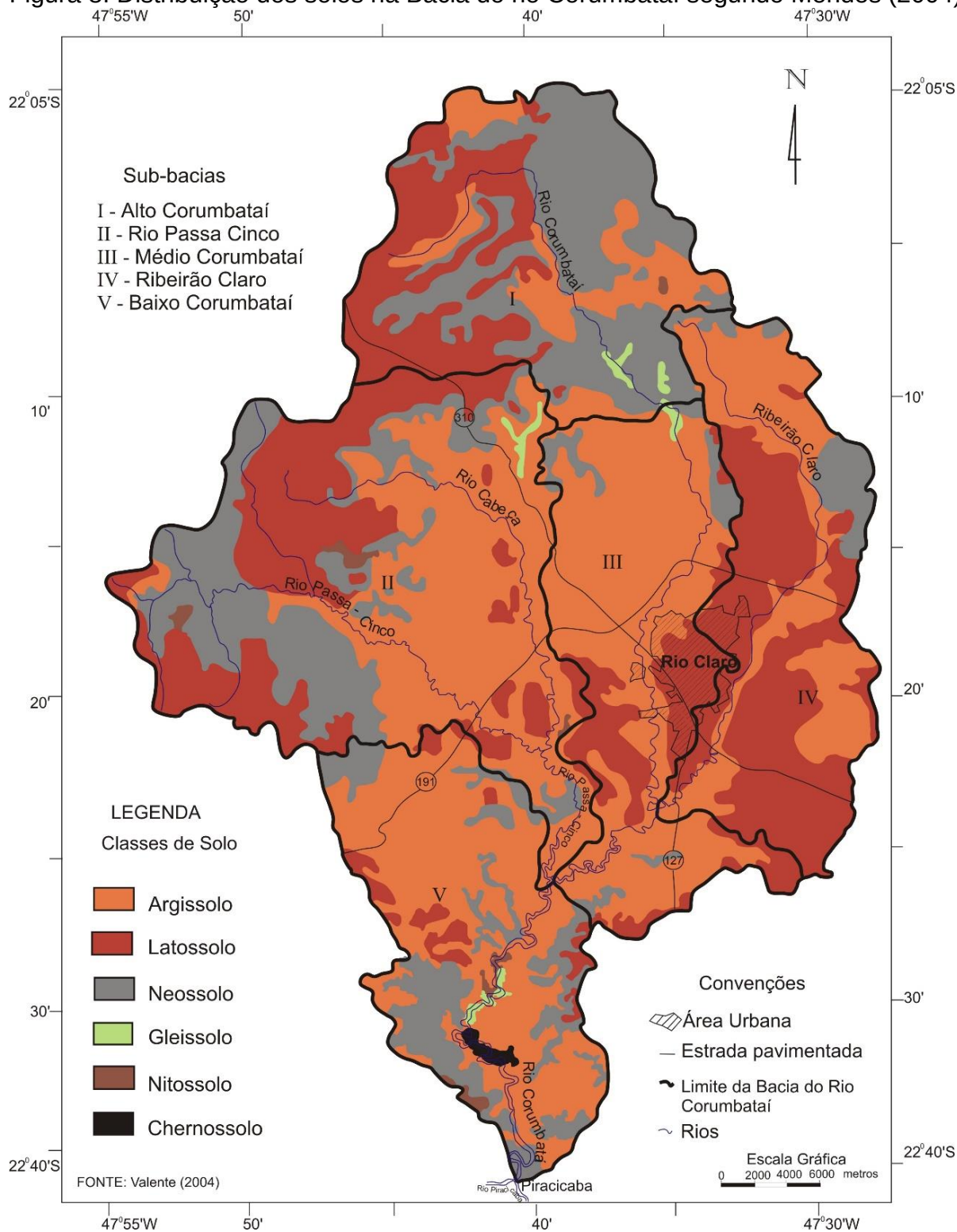


Fonte: Penteado (1976).

De acordo com a classificação de Koppen (1948), o clima da bacia do rio Corumbataí é do tipo Cwa, subtropical, com verões chuvosos e invernos secos e temperatura média do mês mais quente superior a 22°C. As temperaturas mais altas ocorrem no período de dezembro a março e as mais baixas entre junho e julho (média de 17°C) (KOFFLER, 1993). Em relação a precipitação, o regime de chuvas é tropical, com duas estações bem definidas: um período seco de março a setembro (menos de 20% da precipitação anual), e um período chuvoso de outubro a fevereiro (mais de 80% da precipitação anual), sendo o total precipitado no ano em torno de 1390mm (TROPPMAIR; MACHADO, 1974)

Em relação ao contexto pedológico, segundo estudo realizado por Mendes (2004), predomina na área a ocorrência de argissolos (46,25%), latossolos (30,07%), neossolos litólicos (13,6%) e neossolos quatizarênicos (8,83%), como mostra a Figura 8.

Figura 8. Distribuição dos solos na Bacia do rio Corumbataí segundo Mendes (2004).



Fonte: Zaine; Zaine (2009)

Argissolos e latossolos, originados das formações Pirambóia, Botucatu e Rio Claro, apresentam textura arenosa, são solos bem drenados, com lixiviação e infiltração grandes. Esses dois solos são pobres em matéria orgânica, ácidos e pouco adequados para a agricultura. Apenas o latossolo roxo, que está ligado a áreas de ocorrência de *sills* e diques de diabásio, como a do *sill* da Floresta Estadual de Rio Claro, dá origem a "terra-roxa", um solo muito rico para a agricultura (ZAINÉ; ZAINÉ, 2009).

Os neossolos litólicos ocupam pequenas áreas, geralmente associados aos argissolos. Caracterizam-se pela pequena espessura (< 40 cm) e ausência ou espessura muito pequena de horizonte diagnóstico de subsuperfície, que os tornam bastante limitados para a atividade agrícola, e agravados por ocorrerem, principalmente em faixas de relevo acidentado. Já os neossolos quartzarênicos são solos profundos, oriundos de material arenoso, com perfil constituído por um horizonte A fraco ou moderado, sobre um regolito inconsolidado, pouco diferenciado (horizonte C). São solos muito arenosos e muito pobres, com pequena capacidade de retenção de nutrientes e de água para os vegetais, o que limita sua utilização para agricultura (ZAINÉ; ZAINÉ, 2009).

4 EMBASAMENTO TEÓRICO METODOLÓGICO

Neste capítulo são discutidos os aspectos conceituais que nortearam a elaboração e execução do procedimento metodológico adotado na presente tese.

4.1 Conceituação

A primeira observação importante acerca da classificação do relevo é que a mesma há muito é baseada no reconhecimento, interpretação e análise de unidades geomorfológicas, ou seja, padrões de formas semelhantes. No entanto, com o atual emprego de softwares e modelos digitais de elevação (MDE), algumas mudanças estão sendo implementadas nessa metodologia a fim de diminuir cada vez mais o caráter subjetivo das interpretações. Mas, para que os aspectos teóricos do processo sejam bem entendidos é preciso, antes de mais nada, que se faça uma revisão de conceitos relativos às nomenclaturas empregadas e a cartografia geomorfológica.

A compartimentação do relevo corresponde à individualização de um conjunto de formas com características semelhantes. O maior ou menor grau de semelhança entre as formas do relevo tem muito a ver com sua gênese, idade e sobretudo com os processos (dinâmicos) que atuam no presente ou que atuaram no passado e que são os responsáveis pela geração das formas. O relevo, como um dos componentes do meio natural, apresenta uma diversidade enorme de tipos de formas. Essas formas, por mais que possam parecer estáticas e iguais, na realidade são dinâmicas e se manifestam ao longo do tempo e do espaço de modo diferenciado, podendo formar conjuntos ou agrupamentos de formas que guardam elevado grau de semelhança entre si (ROSS, 1991).

Notadamente, a escala espacial da análise das formas, processos e materiais que recobrem a superfície é um elemento definidor do tipo de compartimentação a ser realizada (TRICART, 1965). De acordo com Ross (1991), ao se elaborar uma classificação do relevo em escalas médias, é impraticável tratar o relevo através dos elementos das formas, enquanto em uma escala de detalhe isso passa a ser condição básica.

Nesta pesquisa, pretende-se trabalhar com uma escala média, denominada de semidetalhe pelo (IBGE, 2009), variando entre 1:100.000 e 1:50.000 e assim o foco é identificar e delimitar unidades de padrões de formas semelhantes do relevo. No entanto, a grande disseminação da técnica de compartimentação do relevo para análise da paisagem, suas múltiplas aplicações e a falta de consenso na adoção de ordens de grandeza ou taxonomias, fazem com que ocorram discordâncias quanto ao termo utilizado e o significado pretendido.

Em virtude dessa diversidade de enfoques, optou-se por apresentar alguns termos e definições análogos a unidades de padrões de formas semelhantes.

- Demek (1967) utiliza o termo “tipos de relevo” para o conjunto de elementos que definem um determinado padrão de formas de relevo semelhantes entre si tanto fisionômica, quanto geneticamente;
- Verstappen e Zuidam (1968) propõem o termo “*landform units*”, que descrevem tipos de paisagem que são relativamente uniformes na gênese e formas de relevo;
- Ab’Saber (1969) define como “unidades geomorfológicas” uma área onde as formas do relevo guardam normalmente um acentuado grau de semelhança decorrente da sua estruturação e esculturação;
- Speight (1974) emprega o termo “padrões de formas do relevo” (*landform patterns model*) para uma superfície tridimensional em que elementos mais simples se repetem em intervalos quase regulares em um padrão definível.
- Cooke e Doornkamp (1978) utilizam o termo “unidade de relevo” (*land unit*) com base no conceito de *land system* para classificar áreas homogêneas que podem apresentar uma variação interna relativamente pequena em suas propriedades geomorfológicas, sendo, porém cada uma delas diferente das unidades vizinhas. As unidades de relevo são áreas relativamente homogêneas em termos de geologia, relevo, solo e vegetação contidas em um *land system*;
- IPT (1981) também emprega o termo “unidade de relevo” e classifica uma unidade como parte menor de um sistema de relevo, tendo forma simples e ocorrendo usualmente sobre um único tipo de rocha e em solos cuja variação é consistente. Cada unidade apresenta similitude quanto a amplitude local de cada forma,

declividade e perfil das encostas, extensão e forma dos topos, densidade e padrão de drenagens.

- Ross (1992), baseado nos conceitos de morfoestrutura e morfoescultura, emprega os termos “unidades morfológicas” ou “padrões de formas semelhantes” ou ainda “tipos de relevo”, que se definem por conjuntos de tipologias de formas que guardam entre si elevado grau de semelhança, quanto ao tamanho de cada forma e o aspecto fisionômico;
- Vedovello (1993) utiliza o termo “unidade básica de compartimentação - UBC” para unidades básicas do terreno associadas a ocorrência de geoformas, ou seja, áreas onde ocorre uma associação específica das formas de ocorrência dos vários elementos fisiográficos que compõem a paisagem, e que são resultantes da ação dos elementos exógenos ao meio físico, bem como da dinâmica da evolução e das propriedades intrínsecas dos elementos fisiográficos. As geoformas apresentariam litologia, forma de relevo, perfil de alteração, etc. específicos e constantes em sua área de ocorrência;
- IBGE (2009), baseado no Projeto RADAMBRASIL (BRASIL, 1983), classifica de “modelados” um polígono que abrange um padrão de formas de relevo que apresentam definição geométrica similar em função de uma gênese comum e dos processos morfogenéticos atuantes, resultando na recorrência dos materiais correlativos superficiais. Podem ser identificados quatro tipos de modelados: acumulação, aplanamento, dissolução e dissecação.
- Bettu (2012) resgata o conceito de “unidade de paisagem” (BERTRAND, 1968) e propõem o termo “unidades de paisagem geomórficas - (UPG)” para regiões relativamente homogêneas do ponto de vista da morfologia do relevo.

Todos os trabalhos citados acima têm como procedimento comum a compartimentação do relevo a partir de processos interpretativos de fotografias aéreas e/ou produtos de sensores remotos nos quais as unidades são individualizadas pela sua homogeneidade, mas também baseando-se na sua gênese, embasamento geológico ou ainda uma integração de aspectos (geológico, geomorfológico, solos, etc.). No presente trabalho, buscando um enfoque paramétrico e menos dependente de uma interpretação subjetiva, a geomorfometria foi o principal fator para a compartimentação. O objetivo é

identificar e compartimentar os conjuntos de formas de relevo com morfologia e morfometria semelhantes entre si. Assim, optou-se por utilizar uma nomenclatura que representa-se esses aspectos e “unidades de padrões de formas semelhantes”, sugerida por Ross (1992), mostrou-se um termo bastante coerente.

4.2 Breve Histórico dos Sistemas de Classificação do Relevo

A maioria dos autores concorda, mesmo considerando-a simplificada, com a definição de geomorfologia como “ciência envolvida com o estudo das formas da superfície da Terra” (ST-ONGE, 1968, p. 388, tradução nossa). Contudo, para que esse estudo seja completo há, muitas vezes, a necessidade de ilustrá-lo, já que se trata de formas concretas da superfície e suas possíveis alterações (SOARES, 2008).

De acordo com Hayden (1986), durante muito tempo houve certa dificuldade em ilustrar esses estudos das formas de relevo, pois ao longo do século XIX e mesmo nos primeiros anos do século XX, o estudo das formas de relevo era dominado por uma fisiografia descritiva estática. O autor afirma que mesmo depois da teoria de “ciclo de erosão” proposta por Willian M. Davis (1899), na prática, a maior parte da pesquisa geomorfológica continuou dominada por uma análise fisiográfica inerte.

[...] a paisagem era descrita por escrito, geralmente acompanhada por blocos diagramas artísticos desenhados para ilustrar as conclusões do autor. Ainda que fossem excelentes ilustrações de processos geomorfológicos, tendiam a idealizar retratos qualitativos ao invés de análises gráficas quantitativamente verificáveis da paisagem (HAYDEN, 1986, p. 637, tradução nossa).

O século XIX também marcou o início da utilização das fotografias no estudo das formas do relevo. Segundo Hayden (1986), em 1840, o francês, J. Arago, sugeriu que a fotografia poderia ser útil no mapeamento topográfico e então os fotógrafos e balonistas, Nadar e Triboulet, experimentaram fazer algumas fotos aéreas e verificar a visão que elas forneciam da paisagem. Mas apenas em 1899 elas foram efetivamente usadas para um estudo, quando Albert Heim publicou suas fotografias e observações feitas durante

um vôo de balão sobre os Alpes. Ele foi, provavelmente, a primeira pessoa a usar uma fotografia aérea na pesquisa geomorfológica (HAYDEN, 1986).

Apesar dos avanços tecnológicos na área de fotografia nas primeiras décadas do século XX, as fotos foram classificadas como ferramentas de baixa qualidade e até mesmo foram ignoradas pela geomorfologia em favor dos antigos blocos diagramas. St-Onge (1968) afirma que a descrição de uma forma de relevo ou grupos de formas e a explicação sobre suas origens e idade, continuou quase que exclusivamente por meio de registros escritos. Os “mapas fisiográficos” que, algumas vezes, acompanhavam esses registros, eram elaborados para ilustrar as conclusões do autor e não resultavam de um trabalho de campo e estudo sistemáticos, tendo assim pouca utilidade.

Grant (1970) destaca que nesse período surgiram os primeiros trabalhos com ideias de aplicação das formas do relevo como critério de descrição regional, com Herbersson (1905) e Fenneman (1916).

Mas o primeiro autor a tentar representar as formas do relevo em um mapa foi Passarge em 1914, com o conceito pioneiro de um mapa geomorfológico (detalhado) na forma de um Atlas Morfológico (PEDRAZA, PEÑA, TELLO, 1988; ST-STONGE, 1968; KLIMASZEWSKI, 1982; HAYDEN, 1986). Passarge era discípulo da escola alemã, onde o conceito de paisagem (*landschaft*) era a base dos estudos e tinha um significado tanto de território, como também o caráter visual, integrando todos os elementos que compõem a paisagem (CHRISTOFOLETTI, 1980). Klimaszewski (1982) destaca que Passarge apresentou novos conceitos e realizou uma análise mais global das formas de relevo, integrando-as em uma visão geográfica da paisagem a partir de um novo método com base na cartografia geomorfológica.

A partir de então, com o mapa geomorfológico tomando forma, iniciaram-se discussões sobre suas aplicações. Verstappen (2011) credita a Bourne (1931) a primeira referência ao zoneamento regional com o “princípio da similaridade dos elementos da paisagem”. Bourne (1931) empregou o termo “terreno” para descrever uma pequena área com características uniformes de clima, geologia, geomorfologia e pedologia que poderia ser utilizada como base para o zoneamento regional.

No entanto, apenas depois da Segunda Grande Guerra, com planejadores, engenheiros, agrônomos e outros especialistas requisitando documentos mais precisos

e úteis do que “discussões eruditas em relatórios científicos” que o mapeamento das formas do relevo evoluiu de fato (ST-ONGE, 1968; PAVLOPOULOS, EVELPIDOU E VASSILOPOULOS, 2009).

Segundo Hayden (1986), a Segunda Guerra Mundial foi de extrema importância para a cartografia geomorfológica, pois promoveu avanços no uso das fotografias aéreas e na fotointerpretação, necessárias às análises de terreno para o estilo de guerra “móvel” que ocorreu entre 1939 e 1945. Além disso, como ressalta Soares (2008), houve melhora na qualidade de equipamentos fotográficos, filmes e instrumentos para interpretação, o que multiplicou as possibilidades de estudar as feições e formas de relevo através de fotos aéreas.

A guerra e os avanços das técnicas de pesquisa possibilitaram o desenvolvimento da cartografia geomorfológica moderna. “Foi só depois da Segunda Guerra Mundial que a preparação dos mapas geomorfológicos com base no mapeamento sistemático das formas de relevo apareceu como uma prioridade ou até uma necessidade” (KLIMASZEWSKI, 1982, p. 266, tradução do autor).

Cooke e Doornkamp (1990) afirmam que o mapeamento geomorfológico, como conhecido atualmente, teve início apenas na década de 1950 na Polônia (KLIMASZEWSKI, 1956), onde tem sido utilizado até os dias de hoje como suporte ao planejamento econômico. Segundo Rodrigues (1997), Pedraza, Peña e Tello (1988) e Coltrinari (2011), essa primeira experiência sistemática na Polônia, na escala 1:50.000, foi seguida por outros países como Suíça, Alemanha, Tchecoslováquia, França, Canadá, etc. A partir de então, iniciou-se a preocupação em adotar uma legenda única já que cada grupo de geomorfólogos, às vezes cada pesquisador, estavam desenvolvendo e/ou adaptando sua própria legenda (PEDRAZA, PEÑA, TELLO, 1988).

O primeiro momento de discussão desse assunto foi o 18º congresso da Internacional Geographical Union (IGU), no Rio de Janeiro, em 1956, onde foi reconhecida a importância das cartas geomorfológicas de detalhe. Quatro anos mais tarde, no congresso da IGU de Estocolmo, foi criada a Subcomissão de Mapeamento Geomorfológico, presidida por M. Klimaszewski, cujos principais objetivos eram:

- introduzir e desenvolver a metodologia do mapeamento geomorfológico;
- adotar um sistema e princípios uniformes de cartografia para assegurar sua comparabilidade;
- oferecer, mediante os mapas geomorfológicos, subsídios para o conhecimento do ambiente geográfico e seu uso racional (KLIMASZEWSKI, 1982, p. 266, tradução nossa)

Lollo (1991) afirma que nesse período houve uma grande proliferação de trabalhos com enfoques variados. Enquanto parte dos pesquisadores partiu para uma linha mais voltada aos aspectos puramente geomorfológicos, outro grupo atuou no sentido da aplicação dos conceitos para a avaliação das condições naturais, numa linha mais holística.

A primeira linha, segundo Verstappen (2011), continuou a focar no desenvolvimento e padronização das metodologias do mapeamento geomorfológico de detalhe e no estudo e representação da morfografia, morfogênese, morfodinâmica, morfometria e cronologia das áreas. Essa vertente, mais acadêmica e focada no estudo da evolução do relevo, reuniu geógrafos físicos e geomorfólogos, principalmente europeus, que discutiram e propuseram conceitos e diretrizes para mapas geomorfológicos detalhados ao longo da segunda metade do século XX (COOKE e DOORNKAMP, 1990).

Alguns desses pesquisadores, preocupados quanto ao entendimento e representação do relevo, acabaram por contribuir com propostas taxonômicas e metodologias de análise do relevo que influenciaram pesquisas importantes na linha holística. Dentre os que mais se destacaram, merecem ser mencionados Tricart, Mescerjakov, Demek e Sotchava.

Obedecendo a uma hierarquização de níveis de agrupamento genético, Cailleux e Tricart (1956) elaboraram a primeira classificação geral do relevo terrestre com oito ordens de grandeza temporo-espaciais. Segundo os autores, a classificação proposta constituía um instrumento para clarificar as relações de causalidade entre fatos de diferentes dimensões territoriais, temporais e genéticos. Tricart (1965) afirma que como as ordens de grandeza são espaciais e temporais, imediatamente emerge a relação direta entre tamanho e idade das formas, ou seja, subentende-se que, quanto maior a

extensão do fato geomorfológico, maior é a sua idade, e quanto menor o tamanho, menor a idade. As ordens de grandeza são expressas em quilômetros quadrados, numa tentativa de relacionar dimensão/tamanho com os tipos de formas a elas associadas e procura-se estabelecer relações diretas entre unidades climáticas de diferentes tamanhos com unidades de relevo e gênese, o que certamente na prática isso nem sempre se ajusta. Por fim estabelece relação direta entre cada táxon com um determinado tempo que vai da escala temporal geológica à escala temporal presente, o que certamente se aplica, porém não obrigatoriamente, com os espaçamentos temporais propostos (ROSS, s.d.).

Contemporaneamente à publicação de Tricart (1965), surge na URSS uma outra classificação do relevo proposta por Mescerjakov (1968) discutindo os conceitos de morfoescultura com um novo instrumento de análise geomorfológica. Mescerjakov (1968) considera que o melhor meio de estabelecer a classificação geomorfológica está ligado ao emprego dos conceitos de morfoestrutura e morfoescultura, propostos por Gerasimov em 1946 e 1959, que permitem distinguir a diversidade de formas do relevo do nosso planeta e os mais importantes grupos genéticos. Gerasimov (1946, 1959) afirmava que a classificação é fundamentada na ideia que a formação do relevo resulta da interação das forças endógenas, sob a ação das quais seriam formados os elementos morfoestruturais ou morfotectônicos do relevo, e exógenas, sob a ação das quais seriam formados os elementos morfoesculturais. No intuito de estabelecer uma classificação, Mescerjakov (1968) apresentou um quadro síntese intitulado de “Esquema Geral da Classificação do Relevo Terrestre”, no qual definiu seis níveis hierárquicos correlacionados com superfícies em quilômetros quadrados, semelhante a Tricart (1965). Sua classificação considera seis colunas, sendo que na primeira delas destacam-se as superfícies da terra, em segundo os elementos morfoestruturais e em terceiro as categorias morfoesculturais do relevo (ROSS, s.d.).

Mas a primeira proposta de classificação do relevo terrestre com articulação para a cartografia geomorfológica ocorreu com Demek (1967), ao publicar o trabalho “*Generalization of Geomorphological Maps*”. Citando Tricart (1965), Demek (1967) afirma que a classificação e sistematização das formas do relevo é o principal problema da construção e generalização de mapas geomorfológicos. Objetivando contribuir para a

solução desse problema, o autor apresentou sua classificação baseada em três unidades taxonômicas básicas, sendo: 1- “superfícies geneticamente homogêneas”, como o menor táxon, por exemplo, uma vertente; 2- “forma de relevo”, táxon intermediário, como exemplo, uma colina; 3- “tipos de relevo”, táxon superior, correspondendo a conjuntos de formas semelhantes entre si. Com esta proposição taxonômica, Demek (1967) apresenta um lado pragmático da representação do relevo terrestre, que pode ser transformado em mapa geomorfológico, considerando fatores morfológicos, morfométricos, cronológicos e genéticos dentro de uma hierarquização lógica e absolutamente clara (ROSS, s.d.).

O geógrafo soviético Sotchava, também na década de 1960 (traduzido e publicado em 1977 no Brasil) propôs o conceito de “geossistemas”, que envolvia a ideia de classificação da paisagem em vários níveis. Segundo Sotchava (1977), os geossistemas são sistemas territoriais naturais, que se distinguem no envoltório geográfico, em diversas ordens dimensionais, generalizadamente nas dimensões regional e topológica. Diferenciando-se de Tricart (1965) e Mescerajakov (1968) que embasavam-se apenas nos aspectos geomorfológicos, Sotchava acreditava que o geossistema era o resultado da combinação de fatores econômicos, sociais, geológicos, climáticos, geomorfológicos, hidrológicos e pedológicos associados a certo(s) tipo(s) de exploração biológica. Essa concepção influenciou muitas pesquisas geomorfológicas, como a classificação proposta pelo francês Bertrand (1968), um dos pioneiros no emprego do termo “unidades da paisagem”.

Esses trabalhos desenvolveram-se paralelamente a importantes pesquisas holísticas. Segundo Verstappen (2011), essa segunda linha evoluiu a partir de interesses práticos em utilizar os mapas geomorfológicos para fins de reconhecimento, planejamento, desenvolvimento e gestão do território, principalmente de áreas muito extensas e com poucos dados disponíveis. Os mapas geomorfológicos de detalhe eram muito complexos para este fim e também eram de difícil leitura para pessoas não especializadas. Além disso, forneciam informações completas sobre a geomorfologia da área de estudo, incluindo os processos e morfogênese, mas normalmente não abrangiam dados sobre outros parâmetros ambientais relativos a geologia, solos, hidrologia, vegetação e uso da terra, fundamentais para fins de planejamento regional.

As pesquisas holísticas, portanto, forneciam as informações adicionais necessárias para colocar a geomorfologia em um contexto ambiental e assim, torná-la operacional. Esse fator fez que com essa vertente reunisse pesquisadores de diferentes áreas, como geomorfologia, geografia, geologia, agronomia e geologia de engenharia, o que posteriormente levou a diferentes abordagens de acordo com o interesse de cada área. (VERSTAPPEN, 2011). De acordo com IPT (1981), uma análise histórica sobre a evolução dos trabalhos de classificação do relevo mostra que em épocas mais ou menos definidas prevaleceram tendências de focalizar em uma ou outra dessas áreas.

A principal ideia dos mapeamentos desenvolvidos nessa linha era a compartimentação dos terrenos em unidades de vários níveis, baseando-se nos aspectos geomorfológicos, principalmente nas formas de relevo e processos, mas também analisando integradamente aspectos relativos a geologia, solos, hidrologia, vegetação e uso da terra. Como o objetivo era a aplicação em áreas muito extensas e com poucas informações disponíveis, os mapas em pequena e média escala tornaram-se uma prática comum. Essa abordagem, mais tarde também conhecida como “avaliação de terreno” (*terrain evaluation*), utilizava as fotografias aéreas e produtos de sensoriamento remoto para interpretação e delimitação das unidades e formas do relevo (VERSTAPPEN, 2011).

O uso de fotografias aéreas e posteriormente produtos de sensoriamento remoto deram um novo impulso às pesquisas holísticas. Em primeiro lugar, porque eles fornecem uma imagem exata e detalhada das formas de relevo e, segundo, porque eles dão uma visão sobre as relações ecológicas existentes na região entre os vários elementos da paisagem, como litologia, geomorfologia, solos, hidrologia, vegetação e uso da terra (VERSTAPPEN, 2011).

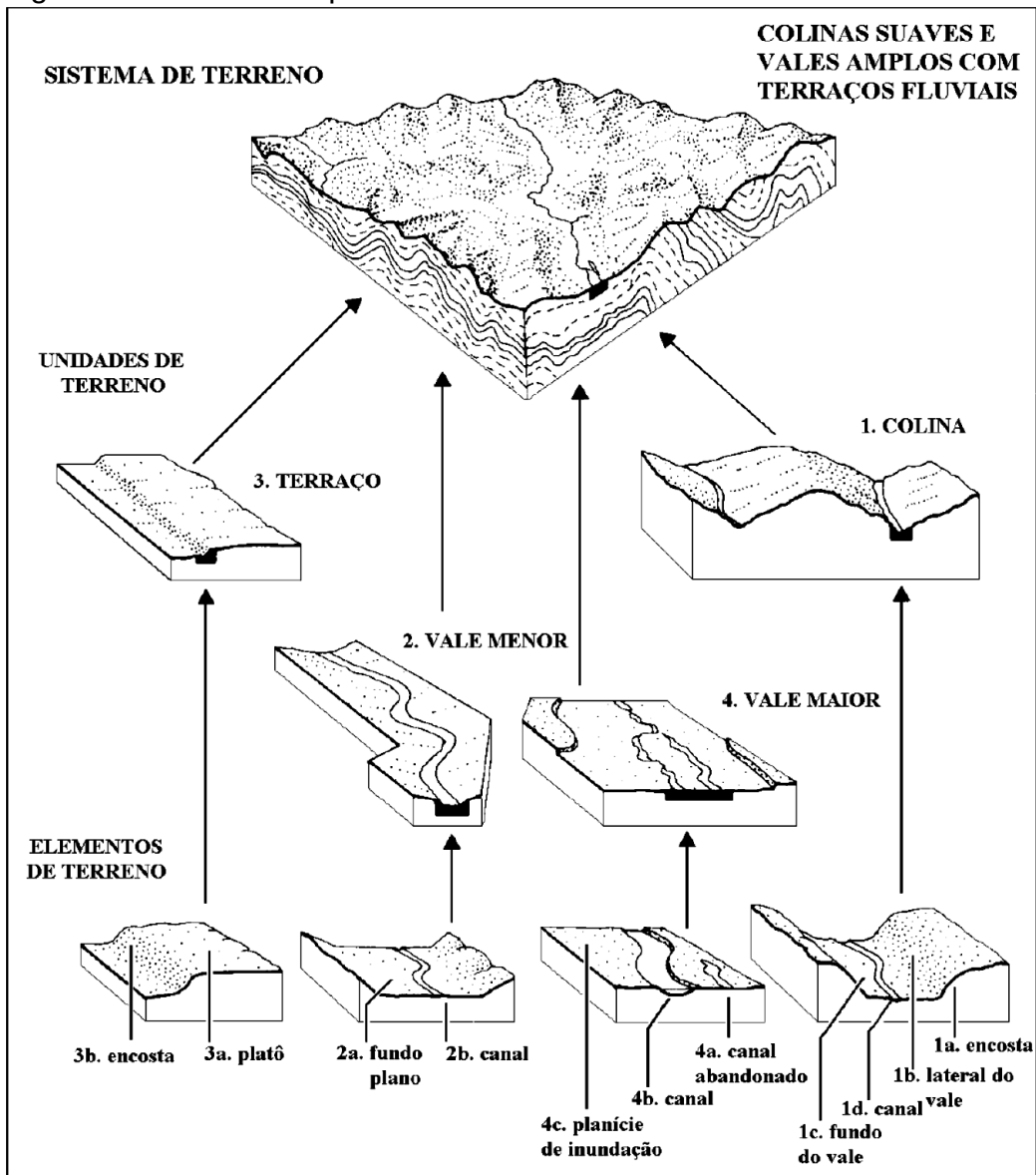
Os primeiros mapeamentos publicados remontam a Bourne (1931), Wooldridge (1932) e Christian e Stewart (1953). Mas o desenvolvimento dos métodos ocorreu principalmente através de países com grandes áreas inexploradas como a Austrália, com o *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO), que visava o reconhecimento de áreas para fins agrícolas, e organizações envolvidas no desenvolvimento regional como *The British Directorate of Overseas Surveys* (DOS), que trabalhou com antigos territórios britânicos na África (VERSTAPPEN, 2011).

O método de mapeamento de sistemas de relevo elaborado pelo CSIRO a partir de 1946 pode ser considerado um dos mais influentes até os dias de hoje. A finalidade era o levantamento sistemático do território (com ênfase em áreas desocupadas) visando a elaboração de um inventário de condições naturais para fins de planejamento regional e a classificação da adequação da terra para fins agrícolas na Austrália e Nova Guiné (IPT, 1981; LOLLO, 1991).

Posteriormente, derivado da metodologia de mapeamento de sistemas de relevo, os australianos desenvolveram o programa PUCE (*Patterns, Units, Components and Evaluation*), o qual tinha como objetivo de fornecer informações para o planejamento da ocupação do meio físico e foi bastante difundido em todo o mundo. A evolução destes conhecimentos e os tipos de aplicação da técnica em território australiano podem ser verificados em Christian e Stewart (1953), Grant (1970, 1975), Arnot e Grant (1974) e Speight (1974, 1990).

Na base do método de sistemas de relevo encontra-se a possibilidade de se compartimentar a área de estudo em unidades cada vez menores (em função da escala e da finalidade pretendidas) a partir do uso de sensores remotos (preferencialmente) ou de trabalhos de campo, tendo-se como base sua uniformidade em termos de formas do terreno, para posteriormente proceder a avaliação das propriedades dos materiais presentes nestas unidades. Os níveis hierárquicos utilizados para este tipo de zoneamento são sistema de relevo ("*land system*"), unidade de relevo ("*land unit*") e elemento de relevo ("*land element*"), como pode ser observado na Figura 9 (LOLLO, 1991; COOKE;DOORNKAMP, 1990).

Figura 9. Níveis hierárquicos do método de sistemas do relevo.



Fonte: Modificado de COOKE e DOORNKAMP (1990) por LOLLO (1991).

De acordo com Lollo (1991) e Cooke e Doornkamp (1990), os trabalhos desenvolvidos no Reino Unido tiveram sua origem nas atividades do "*Military Engineering Experimental Establishment*" e apresentaram como principais características o seu pioneirismo, a concentração de atividades nas colônias africanas, e a utilização da técnica de compartimentação do relevo para estudos regionais. Os trabalhos desenvolvidos na África pelo *The British Directorate of Overseas Surveys* (DOS) empregaram um método similar ao de sistemas de relevo e foram aplicados em países

como Nigéria, Tanzânia, Lesotho, Botswana e África do Sul (IPT, 1981). Nesse último país, a abordagem foi útil para o planejamento no traçado de rodovias e também auxiliou no planejamento urbano. Destacam-se os trabalhos Beckett e Webster (1962), e Knott, Doornkamp e Jones (1980).

Outros países se destacaram no desenvolvimento de métodos de compartimentação do relevo no âmbito das pesquisas holísticas.

Nos Estados Unidos da América os trabalhos seguiram a linha da proposta britânica e tiveram grande desenvolvimento com intensa utilização de fotointerpretação. Os mapeamentos foram orientados principalmente para finalidades rodoviárias (fruto do interesse do "*Highway Research Board*"), expansão agrícola e estudos regionais (através do *US Geological Survey*). Contribuições importantes foram dadas por Fenneman (1938), Belcher (1942), Hammond (1954, 1964), Hofman e Fleckenstein (1961), Miles (1962).

Na Ex-União Soviética partiu-se para a busca de métodos próprios de análise orientados para levantamentos expeditos com vistas a implantação de obras lineares e planejamento regional. Solntsev (1962) foi um dos primeiros a afirmar que as características geomorfológicas e geológicas eram a base para a compartimentação do relevo. Alguns exemplos de trabalhos da URSS são Solntsev (1962), Spiridonov et al. (1979), Simonov (1979) e Ivanov e Chalova (1987).

Em alguns países como o Canadá e França, alguns dos métodos desenvolvidos estavam focados no estudo do uso e ocupação da terra e por isso se embasavam tanto nos elementos biológicos quanto no relevo em si. Gimbarzessky (1966) e Rey (1968) são alguns exemplos desses trabalhos. Os pesquisadores justificavam esse enfoque pelo uso das imagens de sensoriamento remoto, que permitiam observar tão bem os tipos de cobertura, incluindo vegetação natural e os padrões de uso da terra, quanto as formas de relevo.

Na Holanda o método de mapeamento se desenvolveu a partir dos trabalhos do *International Institute of Aerial Survey and Earth Sciences* (ITC) com vistas ao planejamento urbano e regional, incluindo trabalhos regionais multifinalidade (para o levantamento sistemático do território) e trabalhos regionais de finalidade específica (para o detalhamento de áreas de interesse) (LOLLO, 1991).

O ITC investiu na criação de um método internacional de mapeamento geomorfológico baseado em “unidades geomorfológicas”, destacando para cada uma delas o processo morfogenético dominante. É um sistema adequado para diferentes escalas e a leitura do mapa produzido é relativamente fácil (FLORENZANO, 2008). O método abrangente foi publicado através de Verstappen e Van Zuidam (1968) no capítulo “*ITC system of geomorphological survey*” do “*ITC textbook of PhotoInterpretation*”. Os trabalhos divulgavam um sistema de mapeamento geomorfológico próprio, para escalas de representações variadas, mas cujos conteúdos estabeleciam relativa identificação com os propostos pela *Internacional Geographical Union* (IGU) (GUSTAVSSON, 2006).

O desenvolvimento e aplicação do método holandês (denominado “*ITC System*”) pode ser verificado em Verstapeen e Van Zuidam (1968 e 1975), Van Zuidam (1982), Vink (1982), Verstappen (1983) e Meijerink (1988).

O método proposto pelo ITC foi desenvolvido em paralelo ao “*Manual of Detailed Geomorphological Mapping*”, organizado por Demek et al. (1972) e ao “*Guide to Medium Scale Geomorphological Mapping*” organizado por Demek e Embleton (1978) a pedido da IGU. O manual era direcionado a mapeamentos em escala média e de detalhe e propunha uma ordem taxonômica para a divisão de unidades básicas do relevo. De acordo com Demek (1967), há três níveis taxonômicos: as superfícies geneticamente homogêneas que resultam de um determinado processo ou de um complexo de processos geomorfológicos, as formas de relevo que seriam compostas pelas superfícies geneticamente homogêneas e os tipos de relevo, que seriam um padrão de formas do relevo semelhantes entre si tanto fisionômica, quanto geneticamente.

A partir dessa breve exposição, nota-se que historicamente ocorreu um intenso desenvolvimento nas pesquisas geomorfológicas aplicadas e vários sistemas de mapeamento locais e regionais foram elaborados em todo o mundo. Entretanto, ainda hoje não existe um método internacional que estabeleça padrões de mapeamento (FLORENZANO, 2008). Pavlopoulos, Evelpidou e Vassilopoulos (2009) afirmam que é improvável uma classificação universal ante a variabilidade de formas do relevo, as diferentes possibilidades de taxonomias, além dos divergentes interesses dos pesquisadores. Os pesquisadores franceses e húngaros ressaltam o papel da estrutura na definição das unidades geomorfológicas, enquanto os alemães, poloneses, russos e

romenos priorizam à forma. Já os pesquisadores da Grã-Bretanha utilizam um “sistema empírico”, também utilizado pelos belgas e canadenses, que valoriza as vertentes e planos e possibilita a quantificação de diversos parâmetros, incluindo idade e aspectos da gênese. Há ainda o mapeamento dos sistemas de relevo desenvolvido na Austrália e utilizado em diversas outras partes do mundo, inclusive no Brasil (PAVLOPOULOS; EVELPIDOU; VASSILOPOULOS, 2009).

Verstappen (1983) considera que a padronização total é uma necessidade absoluta somente em inventários sistemáticos. Desse modo, a diversidade de sistemas permanece, com alguns bastante difundidos, destacando-se internacionalmente. Segundo Florenzano (2008), entre os diversos sistemas de mapeamento geomorfológico existentes, os mais conhecidos e utilizados são: o francês, proposto por Tricart (1965), o proposto pela *IGU* (DEMEK et al., 1972) e o sistema proposto pelo ITC (VERSTAPPEN; VAN ZUIDAM, 1968).

4.3 Classificações do relevo brasileiro

No Brasil, poucos mapeamentos e classificações do relevo foram elaborados de modo sistemático ao longo dos anos. Moraes Rego (1932) elaborou a primeira proposta de subdivisão do estado de São Paulo definindo grandes unidades fisiográficas, seguido por Deffontaines (1935). Mas foi Aroldo de Azevedo (1949) que propôs a primeira classificação para o relevo do país todo considerando principalmente o nível altimétrico para determinar o que é um planalto ou uma planície.

Ab'Saber (1960), baseado em Penck (1953), elaborou uma classificação, priorizando aspectos geomorfoclimáticos, ou seja, a atuação conjunta dos agentes internos e externos que atuam sobre a gênese do modelado da superfície terrestre. Baseado nos processos de erosão e sedimentação, Ab'Saber (1960) classificou o relevo brasileiro em dois tipos de macro unidades geomorfológicas: planaltos e planície, além de identificar 10 unidades de relevo.

Almeida (1964) propôs uma divisão mais aprofundada do estado de São Paulo e delimitou províncias, zonas e subzonas geomorfológicas baseado nas divisões naturais do relevo.

Mas no final dos anos sessenta, Ab'Saber (1969) já chamava a atenção para a ausência de mapeamentos cobrindo o território nacional em escala mais detalhada, entre 1:100.000 e 1:50.000 e pouco mudou até os dias atuais. Os trabalhos que mais se destacaram foram o Projeto RADAM e RADAMBRASIL, na década de 1970, muito utilizado até hoje, e algumas contribuições isoladas, como a do IPT (1981) e de Ross e Moroz (1997) para o Estado de São Paulo.

O projeto RADAM foi um esforço pioneiro do governo brasileiro na década de 1970 para a pesquisa de recursos naturais e representou um avanço tecnológico na época, pois utilizou imagens de radar. O Projeto RADAM - Radar na Amazônia teve início em 1970 e priorizou a coleta de dados sobre geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso da terra e cartografia da Amazônia e áreas adjacentes da região Nordeste. Devido aos bons resultados do projeto, em 1975 o levantamento de radar foi expandido para o restante do território nacional, visando o mapeamento integrado dos recursos naturais e passando a ser denominado Projeto RADAMBRASIL.

O mapa geomorfológico produzido na escala 1:250.000 e publicado em 1:1.000.000, do Projeto RADAMBRASIL, ao longo dos 15 anos, sofreu melhorias de caráter metodológico que abarcaram quatro fases de trabalho. A primeira grande dificuldade foi justamente adotar uma metodologia para ser aplicada em mapeamento sistemático na escala 1:250.000 visto que as concepções metodológicas desenvolvidas nos países europeus e mesmo através das normatizações da IGU sempre se reportaram à cartografia geomorfológica de detalhe. Além disso, havia outra dificuldade relacionada a utilização de um instrumento novo na área de sensoriamento remoto, no caso, imagens de radar (ROSS, 1990).

Dentre as quatro fases de evolução metodológica do Projeto RADAMBRASIL, a quarta fase se destaca devido à adoção de um ordenamento dos fatos geomorfológicos fundamentando-se no princípio de agrupamentos sucessivos de subconjuntos constituídos de tipos de modelados. De acordo com Torres, Marques Neto e Menezes (2012), o sistema de ordens de grandeza denota alguma influência de Tricart (1965), conforme pode ser observado no Quadro 2.

A imagem de radar permitia distinguir e acompanhar relevos planos ou aplanados pela erosão e diferenciá-los dos relevos dissecados. Durante algum tempo procurou-se

caracterizar estes últimos pelas formas de relevo. Na medida em que se ampliava o domínio sobre a imagem, constatou-se que era importante fornecer, além da forma, o grau de declividade e o grau de aprofundamento da drenagem, conjugado com sua densidade. Assim, os estudos das fácies de dissecação foram aprimorados com o uso de quantificação, obtida através de mapas topográficos, fotografias aéreas e índices estatísticos separados por classes quantificáveis. (PROJETO RADAMBRASIL, 1983).

O Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo foi elaborado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT (1981) no âmbito do Projeto Potencial de Biomassas Vegetais para Fins Energéticos. O objetivo era obter dados para compor o acervo básico de informações referentes ao meio físico paulista e subsidiar o planejamento e implementação da exploração de recursos naturais e o planejamento e adequação da ocupação e uso do solo (IPT, 1981).

O método utilizado para sua elaboração foi o de mapeamento de sistemas de relevo desenvolvido pelo CSIRO, da Austrália. Segundo Ponçano et al. (1979), o método focava em distinguir, numa dada região, áreas cujos atributos físicos fossem distintos das áreas adjacentes. Isto levava a subdivisão da região em áreas de dimensões variáveis desde dezenas até algumas centenas de km², onde era comum existir um padrão recorrente de topografia, solos e vegetação, claramente correlacionados com geologia, geomorfologia e clima.

Quadro 2. Ordenação Taxonômica utilizada no Projeto RADAMBRASIL.

Ordem de grandeza	Expressão geomorfológica	Definição	Exemplo	Representação
1ª	Domínios morfoestruturais	Corresponde às grandes unidades morfoestruturais fortemente condicionadas pela estrutura	1. Domínio remanescente de cadeias dobradas 2. Grandes maciços de rochas cristalinas 3. Bacias sedimentares	Cor básica
2ª	Região geomorfológica	Agrupamento de unidades geomorfológicas de expressão regional que apresentam não mais um controle causal relacionado às condições geológicas, mas, essencialmente, estão ligadas a fatores climáticos atuais ou passados.	1. Planalto do Rio Grande 2. Mantiqueira Meridional	Cor derivada
3ª	Unidades geomorfológicas	Arranjo de formas do relevo fisionomicamente semelhantes, determinadas por uma geomorfogênese comum. A geomorfogênese e a similitude de formas são explicadas por fatores paleoclimáticos e, ou por outros relacionados à natureza dos domínios. Cada unidade geomorfológica mostra tipos de modelados, processos originários e formações superficiais diferenciadas de outras.	1. Planalto de Andrelândia Depressão do Sapucaí 2. Planalto do Itatiaia; Planalto de Campos do Jordão	Cor derivada
4ª e 5ª	Modelados	A 4ª ordem de grande refere-se aos modelados em si, que podem ser de aplanamento, de dissolução, de acumulação ou de dissecação. Já a 5ª ordem qualifica as características inerentes a esses modelados.	1. Planícies fluvial e marinha 2. Karst 3. Conjunto de serras alongadas e escarpas 4. Mares de morros e colinas	Letras-símbolo e variação em conjuntos alfanuméricos.
6ª	Fatos de dimensão areal	Fatos possíveis de serem representados apenas por símbolos lineares ou pontuais	1. Linha de cumeada 2. Dolina 3. Escorregamentos	Símbolos lineares ou pontuais

Fonte: BRASIL (1983)

O mapeamento, publicado na escala 1:1.000.000, foi executado a partir de imagens LANDSAT nas escalas 1:250.000 e 1:500.000, e também a partir de mosaicos semi-controlados de radar 1:250.000. O controle dos tipos de relevo delimitados nas imagens e mosaicos foi realizado através da análise de cartas 1:50.000 e 1:100.000.

Devido a vasta bibliografia sobre as características e subdivisões geomorfológicas do estado, como Moraes Rego (1932), Deffontaines (1935), Monbeig (1949), Ab'Saber (1956), Ab'Saber e Bernardes (1958) e Almeida (1964), os pesquisadores do IPT optaram por detalhar essas propostas prévias de subdivisão do relevo do estado. A divisão do relevo paulista proposta por Almeida (1964), foi mantida em termos de grandes compartimentos, contudo, no mapeamento realizado pelo IPT verifica-se um detalhamento muito maior em termos de zonas e subzonas. Já os sistemas de relevo foram individualizados a partir de três índices, de acordo com a gênese: o embasamento (geologia), o estágio evolutivo e a morfologia. As unidades de relevo presentes em cada sistema foram delimitadas principalmente de acordo com a amplitude local de cada forma e a declividade das encostas, mas outros critérios distintivos foram : o perfil das encostas, extensão e forma dos topos, expressão de cada unidade em área, densidade e padrão de drenagem. A legenda do mapa foi construída com base nessas variáveis, no entanto, o método utilizado no cálculo das mesmas não é apresentado de forma clara (IPT, 1981; FLORENZANO, 2008).

Em 1997, também pelo IPT, Ross e Moroz publicaram um mapa geomorfológico do estado de São Paulo na escala de 1:500.000 baseado na divisão taxonômica proposta por Ross (1992). O mapeamento, que objetivava aprimorar a representação do relevo paulista, foi realizado a partir de imagens de radar na escala 1:250.000 e empregou uma matriz de índice de dissecação modificado do Projeto RADAM.

Essa matriz foi retrabalhada por Ross (1991, 1992, 1994) e empregada para a diferenciação dos padrões de formas semelhantes quanto aos dados morfométricos como o entalhamento dos vales e a densidade de drenagem (dimensão interfluvial). A matriz pode ser observada no Quadro 3.

Quadro 3. Matriz dos índices de dissecação do relevo utilizada por Ross e Moroz (1997) no Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo.

Graus de Entalhamento dos vales (Classes)	Dimensão Interfluvial Média (Classes)				
	Muito grande (1) >3750m	Grande (2) 1750 a 3750m	Média (3) 750 a 1750m	Pequena (4) 250 a 750m	Muito pequena (5) >250m
Muito fraco (1) (< de 20m)	11	12	12	14	15
Fraco (2) (20 a 40 m)	21	22	23	24	25
Médio (3) (40 a 80m)	31	32	33	34	35
Forte (4) (80 a 160m)	41	42	43	44	45
Muito forte (5)	51	52	53	54	55

Fonte: Adaptado de Ross (1992)

Baseado no modelo de evolução de Penck (1953) e nos conceitos de morfoestrutura e morfoescultura de Gerasimov e Mecerjakov (1968), Ross (1992) estabeleceu os dois primeiros níveis da ordem taxonômica que norteou o mapeamento geomorfológico do estado de São Paulo. Avançando no raciocínio dos níveis, numa releitura da proposta elaborada por Demek (1967), Ross (1992) propôs outros quatro táxons, ressaltando que a classificação deveria ser calcada fundamentalmente no aspecto fisionômico que cada tamanho de forma de relevo apresenta, não interessando a rigidez da extensão em km², mas sim o significado morfogenético e as influências estruturais e esculturais no modelado. O Quadro 4 e a Figura 10 ilustram a ordem taxonômica proposta por Ross (1992).

Os trabalhos citados são tidos como referência no país e alicerçaram mapeamentos regionais mais recentes como o Mapa de Unidades Geomorfológicas do Estado do Rio de Janeiro (CPRM, 2000) na escala 1:500.000, o Mapeamento Geomorfológico do Estado do Paraná (SANTOS et al. 2006) na escala 1: 250.000, o Mapeamento Geomorfológico do Estado do Espírito Santo (COELHO et al., 2012) e Mapa Geomorfológico do Município de Porto Alegre – RS (MOURA; DIAS, 2012).

Quadro 4. Ordenação Taxonômica utilizada no mapa geomorfológico do estado de São Paulo elaborado por Ross e Moroz (1997).

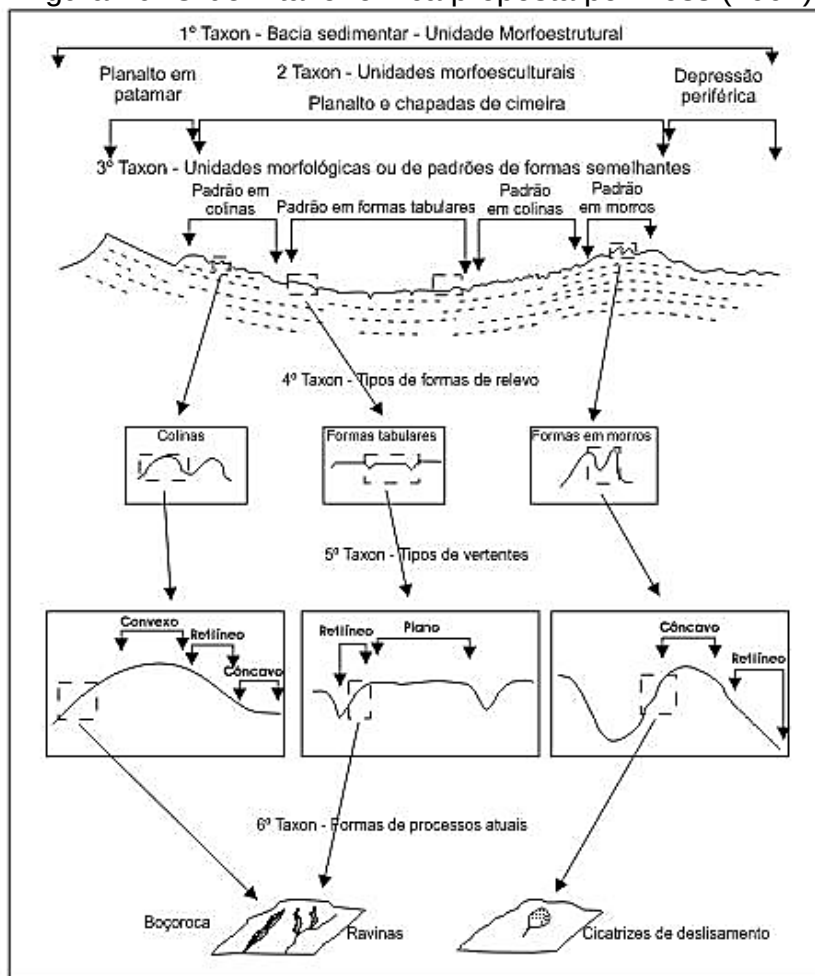
Ordem de grandeza	Expressão geomorfológica	Definição	Exemplo	Representação
1 ^a	Unidades Morfoestruturais	Correspondem às grandes macroestruturas, como os escudos antigos, as faixas de dobramentos proterozóicos, as bacias paleomesozóicas e os dobramentos modernos. Essa unidade pode conter uma ou mais unidades morfoesculturais, associadas a diversidades litológico-estruturais, guardando evidências das intervenções climáticas na elaboração das grandes formas;	1. Bacia sedimentar do Paraná 2. Cinturão Orogênico do Atlântico	Cor básica
2 ^a	Unidades Morfoesculturais	Correspondem aos compartimentos gerados pela ação climática ao longo do tempo geológico, com intervenção dos processos tectogenéticos. São caracterizadas pelos planaltos, planícies e depressões, que estão inseridas numa unidade morfoestrutural.	1. Depressão Periférica Paulista 2. Planalto e Serra da Mantiqueira	Cor derivada
3 ^a	Unidades Morfológicas ou dos Padrões de Formas Semelhantes ou Tipos de Relevo	Correspondentes ao agrupamento de formas relativas aos modelados, que são distinguidas pelas diferenças da rugosidade topográfica ou do índice de dissecação do relevo, bem como pelo formato dos topos, vertentes e vales de cada padrão.	1. Mares de morros 2. Colinas 3. Planícies fluviais	Conjuntos de letras símbolos e números arábicos
4 ^a	Formas de Relevo	Corresponde a cada uma das formas de relevo encontradas nas Unidades dos Padrões de Formas Semelhantes. Assim, se um determinado padrão se distingue por um conjunto de colinas, onde prevalece determinadas características morfológicas, morfométricas, genéticas, cronológicas, cada uma das colinas desse conjunto corresponde a uma dimensão individualizada do todo.	1. Colina 2. Morro	Símbolos lineares ou pontuais

Continua na próxima página.

Ordem de grandeza	Expressão geomorfológica	Definição	Exemplo	Representação
5ª	Setores ou elementos ou partes de cada uma das formas de relevo individualizadas	Corresponde aos tipos de vertentes ou setores das vertentes de cada uma das formas do relevo. Cada tipologia de forma de uma vertente é geneticamente distinta; cada um dos setores dessa vertente pode apresentar características geométricas, genéticas e dinâmicas também distintas.	1. Vertentes convexas, côncavas, retilíneas ou planas	Símbolos lineares ou pontuais
6ª	Processos atuais ou formas geradas pela ação antrópica	Refere-se às formas menores resultantes da ação dos processos erosivos atuais ou dos depósitos atuais.	1. Sulcos 2. Assoreamentos 3. Cicatrizes de escorregamentos 4. Depósitos coluviais	Símbolos lineares ou pontuais

Fonte: Adaptado de Ross (1992) e Ross e Moroz (1997)

Figura 10. Ordem taxonômica proposta por Ross (1992).



Fonte: Ross (1992)

4.4 Geomorfometria

Iniciada há cerca de 150 anos nos trabalhos de Alexander von Humboldt (PIKE, 2002), a geomorfometria, também conhecida como geomorfologia quantitativa ou análise digital de terreno ou ainda modelagem digital de terreno, é uma doutrina que emprega ferramentas das ciências da Terra, matemática, engenharia e ciência da computação para a quantificação de variáveis e parâmetros relacionados à superfície topográfica (PIKE, 1998; GROHMANN, 2008). De acordo com Evans (1972), o prefixo “geo” é necessário para tornar o termo mais específico, diferenciado da morfometria utilizada em outras áreas da ciência. No entanto, nesse trabalho serão utilizados como sinônimos.

De acordo com Evans (1972), a geomorfometria tem duas ramificações principais, denominadas de geomorfometria específica e geomorfometria geral. A geomorfometria específica se ocupa das geoformas com características particulares, como canais de córregos ou colinas, que podem ser separadas das geoformas adjacentes e estão estreitamente vinculadas a processos específicos. Já a geomorfometria geral mensura e analisa as características das formas do terreno para qualquer superfície rugosa continua. Evans (1972) destaca que cada uma das abordagens tem seus pontos positivos e negativos. A geomorfometria geral emprega simultaneamente conceitos bastante objetivos como a altitude de superfície, gradiente, distância e área, e conceitos subjetivos como convexidade, relevo, dissecação e textura, o que permite variações em suas definições de operação. Ainda assim, considera-se que essa abordagem fornece as bases para a comparação quantitativa de diferentes paisagens. Já a geomorfometria específica é mais limitada, pois recorre a muitas decisões arbitrárias, deixando um maior espaço para a subjetividade na quantificação dos conceitos. Por outro lado, as variáveis estão mais relacionadas a processos, o que é normalmente utilizado nas definições operacionais.

A partir dos estudos de Evans (1972), que introduziu pela primeira vez um sistema integrado de geomorfometria, a disciplina evoluiu rapidamente. Nas últimas décadas, graças ao aumento exponencial da capacidade de processamento dos computadores, a difusão dos aplicativos de sistema de Informações Geográficas (SIG) e à disseminação do uso de modelos digitais de elevação (MDEs) (EVANS e MCCLEAN, 1995; WOOD,

1996; SHIMIDT e DIKAU, 1999; VALERIANO e CARVALHO JUNIOR, 2003; SMITH et al., 2006; MINÁR e EVANS, 2008; PIKE et al., 2009) a análise digital do terreno se consolidou e tem se tornado uma fonte de informação cada vez mais confiável na classificação do relevo e na estimativa de diversos fenômenos, como erosão do solo, movimentos de massa, fluxo de água, entre outros (VASCONCELOS et al, 2012).

Tricart (1965) considera os dados morfométricos de extrema relevância na avaliação do relevo e os emprega como uma das bases em sua proposta de mapeamento geomorfológico. A altimetria, dimensões, desníveis, extensões entre outros itens associados à mensuração das unidades do relevo são elementos que auxiliam sobremaneira a interpretação do relevo (AUGUSTIN et al., 2011). Mas tradicionalmente a obtenção destes dados caracterizava-se por tarefa dispendiosa e morosa em virtude da necessidade de mapas de qualidade, em escala adequada e intenso trabalho manual que estava sujeito à subjetividade do analista (GROHMANN, 2008).

A introdução das técnicas digitais viabilizou uma dinamização no processamento e interpretação das variáveis morfométricas. A partir da década de 1960, alguns pesquisadores passaram a publicar suas experiências. Morse (1968) procurou visualizar o comportamento topológico das superfícies topográficas a partir das curvas de nível em ambiente computacional, mas apontou dificuldades para o tratamento satisfatório dos dados expressos em isolinhas. Evans (1972) introduziu pela primeira vez um sistema integrado de geomorfometria, focado principalmente em dados derivados da altitude. Peucker e Douglas (1975) discutiram os problemas de codificação da superfície topográfica nos sistemas computacionais. Mark e Aronson (1984) avaliaram o uso do modelo da geometria fractal para descrever o comportamento estatístico da superfície terrestre, buscando assimilar a complexidade da topografia de forma mais eficiente em ambiente digital. Dikau et al. (1995) adaptaram para o meio digital uma metodologia de classificação do relevo baseada em dados morfométricos derivados de modelos digitais de elevação (MDEs).

Nos últimos anos, um importante progresso foi alcançado na melhoria da precisão altimétrica, com o desenvolvimento de novos algoritmos e softwares para calcular atributos do relevo. Neste contexto, destacam-se os trabalhos de Ehsani e Quiel (2008), Steinke e Sano (2011) e Jasiewicz e Stepinski (2013), que realizaram análises

semiautomáticas de dados morfométricos para o reconhecimento de padrões de formas do relevo através de MDEs e, ainda, Ghimire (2014) que identificou e analisou um grupo de variáveis morfométricas para a classificação de bacias hidrográficas de primeira ordem. Além da evolução tecnológica, o desenvolvimento de novas técnicas e metodologias de análise morfométrica do relevo em ambiente computacional foi motivado pelo interesse em superar a subjetividade relativa às interpretações realizadas manualmente.

No entanto, apesar de toda evolução tecnológica em ambiente digital, alguns problemas apontados por Evans (1972) ainda persistem na geomorfometria. Até os dias de hoje não há um consenso na forma de se quantificar as formas do terreno, o que leva cada pesquisador a desenvolver sua forma de operacionalização de um conceito. Nota-se que surgem cada vez mais parâmetros para avaliar o relevo, mas não há uma concordância quanto a melhor técnica para o cálculo de cada um. Também há divergência quanto aos parâmetros mais relevantes para cada tipo de pesquisa ou para cada tipo de terreno. Além disso, o aumento do número de parâmetros e das técnicas estatísticas para seus cálculos tornam as análises muito complexas, demandando tanto ou mais tempo para seleção dos parâmetros, análise e interpretação dos resultados do que o método manual utilizado na década de 1970.

Basicamente, Evans (1972) e Mark (1975) consideraram que os parâmetros geomorfométricos são de duas naturezas: (i) regional, quando sua medição depende dos valores extremos na distribuição das elevações dentro de uma subárea finita de uma superfície; e (ii) local, quando seu cálculo é definido em todos os pontos da superfície e os valores em cada ponto dependem das elevações da sua vizinhança. Wilson e Gallant (2000) consideram dois tipos de atributos topográficos: (i) os primários ou aqueles que podem ser calculados diretamente da elevação; e (ii) os secundários (índices), que são gerados pela combinação de dois ou mais atributos topográficos primários.

Entre os parâmetros geomorfométricos primários e de natureza local, os mais amplamente difundidos são a declividade, a orientação das vertentes, a curvatura vertical, a curvatura horizontal e a própria altitude. Estes podem ser determinados localmente pela derivação da superfície topográfica a partir de um MDE. No contexto regional, as características topográficas podem ser descritas em termos da distribuição

da frequência da altitude ou por seus momentos estatísticos. Entre os parâmetros geomorfométricos desta natureza, relativamente menos estudados, mas tão importantes quanto as variáveis de natureza local, estão a altura, a dissecação, a amplitude e a predominância (MUÑOZ, 2009).

Ao contrário de alguns pesquisadores contemporâneos de Evans (1972), que acreditavam que apenas um parâmetro poderia explicar toda a complexidade da superfície, a tendência atual é exatamente oposta, utilizando-se muitos parâmetros para explicar um fenômeno específico. Dezenas de parâmetros geomorfométricos são citados na bibliografia nacional e internacional, aparecem sob a forma de diversas denominações e muitas vezes apresentam elevado grau de redundância dos dados obtidos, prejudicando a interpretação dos resultados.

Mas o principal problema da geomorfometria, segundo Evans (1972) é o fato de que todas as medidas variam com a escala de análise. Escala, nesse contexto, pode ser definida como a combinação de duas características: a resolução do dado e a extensão espacial da análise. Goodchild e Quattrochi (1997) explicam que variando-se uma ou ambas dessas características, o valor do parâmetro medido tende a mudar, apresentando um efeito chamado de tendência de escala. Qualquer tentativa de se descrever completamente uma superfície deve então considerar sua inerente tendência de escala em um esforço de identificar escalas críticas ou dominantes, onde quebras significativas na tendência ocorrem. Esse procedimento, contudo, não é óbvio ou direto e, apesar de muito já ter sido escrito sobre o assunto como os trabalhos de Gallant e Hutchinson (1997), Schmidt e Andrew (2005), Dragut et al. (2009) e Behrens et al. (2009), ainda são necessários estudos mais profundos para a identificação de tais escalas, especialmente de forma automatizada (GORINI; MOTA, 2011).

Apesar desse panorama, Florenzano (2008) acredita que a maior vantagem de um mapeamento baseado na análise geomorfométrica, além do aspecto quantitativo e objetivo, é o seu caráter universal, ao contrário do que ocorre com as demais cartas geomorfológicas. Uma unidade de relevo com orientação preferencial NE, por exemplo, é comparável com qualquer outra com a mesma orientação, sendo compreendida em qualquer parte do mundo. Com a crescente disponibilidade de dados digitais de altitude

e processos automáticos de geração das variáveis derivadas, amplia-se cada vez mais a utilização desse tipo de carta para várias finalidades.

4.5 Classificação automatizada do relevo

Os estudos mais recentes de cartografia geomorfológica têm abarcado a análise digital do relevo a partir de modelos digitais de elevação (MDE) e a automatização do processo de classificação das formas do relevo. Esse fato se deve principalmente ao desenvolvimento tecnológico que possibilitou a implementação de variados algoritmos geomorfométricos em pacotes de software comerciais e/ou livres de sistemas de informação geográfica.

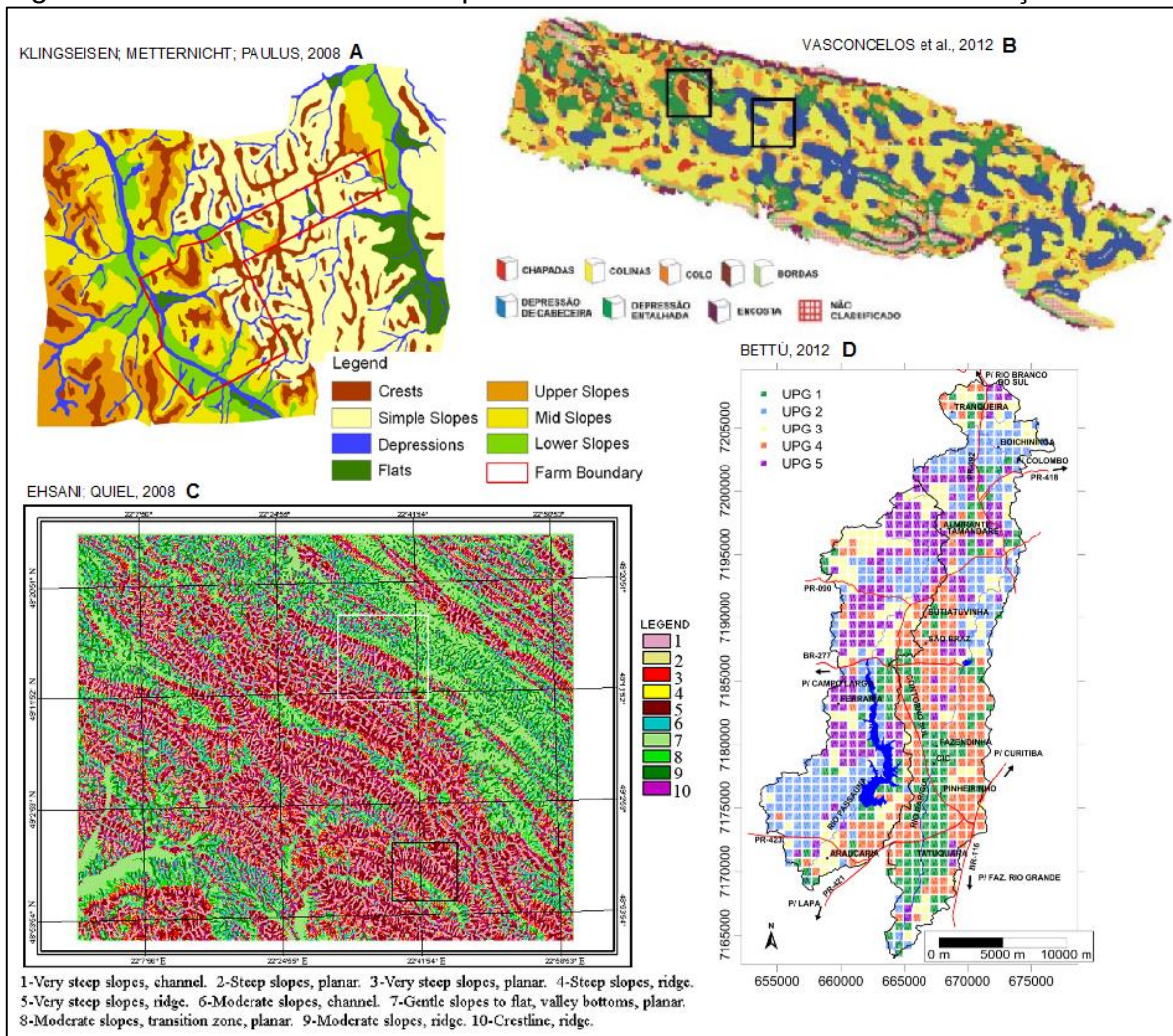
Contudo, além da evolução tecnológica, o desenvolvimento das propostas de análise digital e das classificações automáticas do relevo em ambiente computacional foi motivado também pelo interesse em reduzir a subjetividade relativa às interpretações realizadas visualmente (KLINGSEISEN et. al, 2008). Essa preocupação na quantificação dos dados advém de estudos como o de Van Westen (1993) sobre a interpretação visual do relevo. Em um teste conduzido por Van Westen (1993) para avaliar a variabilidade na delimitação de unidades geomorfológicas por meio de fotointerpretação, apenas 10% da área foi considerada a mesma unidade por intérpretes voluntários. Esse resultado corrobora a questão de haver grande dependência entre a precisão na delimitação das unidades de relevo e a experiência do fotointérprete, revelando um elevado grau de subjetividade nos mapeamentos. Deste modo, as classificações automáticas do relevo se apresentam como instrumentos de apoio ou até mesmo alternativas às técnicas já consagradas de interpretação visual, avançando em termos de objetividade e replicabilidade nas compartimentações geomorfológicas (VENTURA e IRVIN, 2000).

Atualmente, os trabalhos de classificação estão bastante focados em aplicar técnicas de análise espacial e de imagens e modelos estatísticos. Podem-se destacar trabalhos que empregam a técnicas de OBIA (*Object Based Images Analysis*) e de árvore de decisão (BERTANI; ROSSETTI; ALBUQUERQUE, 2013; DRĂGUȚ; BLASCHKE, 2006; DRĂGUȚ; EISANK, 2011, 2012; VASCONCELOS et al., 2012; VERHAGEN; DRĂGUȚ, 2012), lógica Fuzzy (ARRELL et al., 2007; BURROUGH; VAN GAANS;

MACMILLAN, 2000; SCHMIDT; HEWITT, 2004), redes neurais e redes Bayesianas (CARR, 1996; EHSANI; QUIEL, 2008), Geoestatística (BETTÚ, 2012; HENGL et al., 2008), análise estatística multivariada (ADEDIRAN et al., 2004; GHIMIRE, 2014) e outras formas de análise espacial utilizando sistemas de informação geográfica (BOCCO; MENDOZA; VELAZQUEZ, 2001; BRABYN, 1996, 1998; DIKAU et al., 1995; DIKAU; BRABB; MARK, 1991; JOSHI; MAURYA; CHAMYAL, 2013; KLINGSEISEN; METTERNICHT; PAULUS, 2008; METTERNICHT; KLINGSEISEN; PAULUS, 2005; STEINKE; SANO, 2011). A Figura 11 mostra os resultados produzidos por algumas dessas técnicas.

Bettú (2012) faz uma análise das técnicas mais utilizadas e afirma que enquanto métodos para extração de parâmetros geomorfométricos são oferecidos em aplicativos de SIG padrão, mostrando bons resultados, o mapeamento integrado de objetos geomorfométricos, como das unidades de relevo, ainda estão por ser desenvolvidos. Schimit e Dikau (1999) afirmavam no final da década de 1990 que os aplicativos de SIG apresentavam limitações devido à simplicidade dos métodos analíticos, como técnicas de filtragem e sobreposição cartográfica, estrutura restrita dos métodos e ferramentas, se opondo a complexidade necessária à análise geomórfica. Ao longo dos últimos anos esses problemas têm sido minimizados, mas novas dificuldades tem surgido no ambiente computacional.

Figura 11. Resultados obtidos a partir de variadas técnicas de classificação do relevo.



Fonte: A. KLINGSEISEN; METTERNICHT; PAULUS (2008); B. VASCONCELOS et al. (2012); C. EHSANI; QUIEL (2008); D. BETTÚ (2012)

O dimensionamento e resolução dos dados de entrada são considerados fatores que podem gerar grandes problemas no resultado final da classificação automática do relevo. Trabalhos desenvolvidos por Brabyn (1996) e Gorini (2009) identificaram erros sistemáticos produzidos em processos automatizados como zonas espúrias, zonas não classificadas corretamente, formas de relevo não identificadas, entre outros. Conforme descreveram Brabyn (1996), Schmidt e Dikau (1999) e Grohmann (2008), variações quanto aos dados de entrada devem ser testados, a fim de reduzir a geração de feições

espúrias, bem como de evitar a confusão entre classes diferentes nos resultados das classificações automatizadas.

Tentativas de melhorar a automatização do processo através da integração de dados de sensores remotos, como imagens orbitais multiespectrais e modelos digitais do terreno, ainda apresentam resultados insatisfatórios (SCHMIDT e DIKAU, 1999; BRABYN, 1996; DIKAU et al., 1991; GROHMANN 2008). Na maioria dos casos as feições de interesse são classificadas corretamente, porém a integração das variáveis visando delimitar diferentes unidades geomorfológicas representa ainda grande desafio em decorrência da dificuldade de desenvolvimento de algoritmos que contemplem coerentemente a complexidade das relações entre as estruturas vertical e horizontal da paisagem. Enquanto a estrutura vertical reflete a superposição dos indicadores, como por exemplo, a declividade ou a rugosidade do relevo, a estrutura horizontal trata da espacialização destas características. A dificuldade maior está em definir os limites entre as diferentes unidades geomorfológicas, já que os indicadores (estrutura vertical) variam de forma independente, em taxas de variação e tendências direcionais diferentes. Esta variação é tida como contínua apenas para efeito de estimativa, uma vez que são utilizados múltiplos pontos na composição do atributo, mesclando pontos de diferentes unidades de relevo. (BETTÚ, 2012)

Outras limitações encontradas em tentativas de automatização dizem respeito à particularidades do relevo, como destaca Gorini (2009), que verificou que remanescentes menores, internos a grandes províncias morfológicas, podem não ser classificados adequadamente. Também a análise baseada em celas individuais pode ser inválida para determinados ambientes ou objetivos, pois estas estão relacionadas a componentes dos objetos ou áreas e não a esses integralmente (HOFFMANN et al., 2000). Nessa linha, Romstad (2001) afirma que a falta de coerência espacial na classificação, resultado comum nos processos automatizados, se deve à sobreposição entre diferentes classes, decorrentes dos atributos que as caracterizam.

O Quadro 5 apresenta uma síntese das principais características e limitações dos estudos dos parâmetros geomorfométricos e de classificações automáticas das formas de relevo.

Quadro 5. Síntese das principais características e limitações dos estudos dos parâmetros geomorfométricos e de classificações automáticas das formas de relevo.

Autores	Técnica empregada	Objetivos	Dados de entrada	Parâmetros geomorfométricos utilizados	Limitações encontradas
DIKAU, BRABB e MARK (1991)	Classificação automática baseada em um SIG e na análise de vizinhança	Adaptar e avaliar uma metodologia de classificação automática do relevo	Modelo digital de elevação com 100 metros de resolução	Declividade, amplitude e perfil do relevo	Os resultados foram comparados a um mapa produzido a partir da mesma metodologia, mas de forma manual. Algumas diferenças foram encontradas na espacialização das classes devido ao tamanho da janela móvel utilizada.
BRABYN (1996)	Classificação automática baseada em um SIG e na análise de vizinhança	Realizar uma macro-classificação automática do relevo	Cartas topográficas na escala 1:250.000	Declividade, declividade média, amplitude, perfil do relevo	Os principais problemas descritos pelo autor referem-se ao tamanho da janela móvel utilizada e definição dos intervalos de valores dos parâmetros utilizados.
BURROUGH; VAN GAANS; MACMILLAN (2000)	Lógica Fuzzy	Apresentar formas de superar limitações como a criação de zonas espúrias a partir do emprego de métodos de amostragem espacial, modelagem estatística e lógica fuzzy.	Modelo digital de elevação com 75 metros de resolução	Elevação, declividade, curvatura vertical, curvatura horizontal, proximidade do cume, irradiação anual, Índice de umidade média	Os autores tiveram dificuldades em encontrar técnicas adequadas de cálculo dos parâmetros a partir do MDE que não gerassem perturbações nos dados.
KLINGSEISEN; METTERNICHT; PAULUS (2008)	Classificação semiautomática baseada em um SIG e na assinatura digital	Implementar um aplicativo desenvolvido em um SIG para a classificação semi-automatizada de elementos de paisagem como cristas, planícies, depressões e encostas.	Modelo digital de elevação com 10 metros de resolução	Curvatura vertical, curvatura horizontal, declividade, amplitude e percentual de elevação	Os resultados foram comparados com um mapa elaborado por um fotointérprete e a concordância foi de 62,9%. Os principais problemas ocorreram nas áreas de transição entre as formas de relevo.

Autores	Técnica empregada	Objetivos	Dados de entrada	Parâmetros geomorfológicos utilizados	Limitações encontradas
EHSANI e QUIEL (2008)	Redes neurais	Aplicar um método semi-automático utilizando uma rede neural não supervisionada para analisar características geomorfológicas dos elementos de relevo	Modelo digital de elevação derivado do SRTM, com 90 metros de resolução	Declividade, curvatura mínima, curvatura máxima e curvatura transversal	A metodologia empregada não funcionou adequadamente para a identificação de áreas planas.
GORINI (2009)	. Classificação automática baseada na assinatura digital	Desenvolver e testar um procedimento de classificação geomorfológica para descrever o fundo do oceano em uma abordagem multi-escala e classificar a topografia em domínios fisiográficos distintos.	Modelo digital do fundo oceânico	Declividade, rugosidade, elevação e perfil da vertente	Os autores descrevem como principal problema algumas áreas não terem sido classificadas.
DRĂGUT; EISANK (2011)	OBIA (Object Based Images Analysis)	Introduzir um método baseado na análise ao objeto para classificar automaticamente a topografia a partir de dados SRTM.	Modelo digital de elevação derivado do SRTM, com 90 metros de resolução	Amplitude, perfil do relevo e elevação média	A classificação produziu padrões gerais visualmente comparáveis às classificações manuais, mas pareceu mais generalizada. Os autores não realizaram uma avaliação mais profunda do método.
VASCONCELOS et al. (2012)	Árvore de decisão	Propor um método de classificação sequencial das formas do relevo a partir de um sistema baseado em duas etapas: classificação por árvore de decisão dos dados de altitude e de declividade, e subdivisão de classes anteriores utilizando atributos de curvatura.	Modelo digital de elevação derivado do SRTM, com 90 metros de resolução	Altimetria, declividade, curvatura vertical, curvatura horizontal, curvatura mínima, curvatura máxima, curvatura transversal e curvatura longitudinal	Foram relatados pelos autores alguns problemas relativos à confusão entre as classes e descontinuidades abruptas que não condizem com a realidade.

Autores	Técnica empregada	Objetivos	Dados de entrada	Parâmetros geomorfométricos utilizados	Limitações encontradas
BETTÚ (2012)	Geoestatística	Desenvolver uma metodologia para classificação do relevo a partir da geração de índices geomorfométricos, baseada na análise da variância direcional de dados altimétricos.	Modelo digital de elevação derivado do SRTM, com 90 metros de resolução	Altimetria, declividade, forma da encosta, índice de rugosidade do relevo, índice de angulosidade do relevo, índice de densidade de relevo, índice de anisotropia de relevo, direção de anisotropia de relevo, dimensão fractal do relevo.	Com o intuito de empregar parâmetros que não fossem correlacionados, o autor excluiu a altitude em sua análise, o que resultou no agrupamento de áreas diversas em uma só classe.
BERTANI; ROSSETTI; ALBUQUERQUE (2013)	OBIA (Object Based Images Analysis)	Discriminar áreas de vegetação aberta de floresta tropical densa, assim como classificar contrastes topográficos dentro de uma densa floresta	Modelo digital de elevação derivado do SRTM e imagem Landsat-7/ETM+	Elevação e perfil do relevo	Como a área de estudo englobava uma floresta densa, os autores consideraram que apenas a imagem multiespectral era insuficiente para a classificação topográfica e mesmo com o uso do MDE, a vegetação pode interferir no cálculo da elevação.
GHIMIRE (2014)	Análise estatística multivariada	Identificar o grupo de variáveis morfométricas que contribuem para a análise morfológica das bacias de primeira ordem, além de caracterizar tipos de bacias com base em suas propriedades morfométricas.	Cartas topográficas na escala 1:25.000	21 variáveis morfométricas de bacias de primeira ordem (elevação, integral hipsométrica, comprimento do canal, densidade de drenagem, etc.)	Alguns parâmetros apresentaram significativa correlação entre si, o que dificultou a interpretação dos resultados.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.1 A metodologia de Hammond (1954, 1964)

Nas décadas de 1950 e 1960 a geografia humana americana passava por um período de grande destaque graças ao uso extensivo de métodos quantitativos. No entanto, outros campos da ciência geográfica, como a geomorfologia, ainda se apoiavam em procedimentos interpretativos e subjetivos que geravam resultados pouco comparáveis e muitas vezes, pouco reproduzíveis. Insatisfeito com esse quadro, Hammond (1954) acreditou que o estudo do relevo se beneficiaria ao buscar métodos mais objetivos em outros campos da geografia e assim o fez. O autor elaborou uma metodologia de classificação das formas de relevo de natureza quantitativa, com definições explícitas que poderiam ser facilmente comparadas e aplicadas por outros pesquisadores.

Planejando mapear o relevo de grandes áreas e com poucos dados disponíveis, Hammond (1954, 1964) selecionou parâmetros que representassem satisfatoriamente a geometria do terreno e que pudessem ser facilmente calculados e divididos em classes. A partir da experiência adquirida em trabalhos anteriores e de um período de testes, os parâmetros escolhidos pelo autor foram: declividade, amplitude e perfil de relevo. A caracterização dos materiais de superfície também é citada como um quarto parâmetro, mas apenas de forma descritiva e pontual. O autor estabeleceu intervalos de forma arbitrária para cada parâmetro e definiu as classes resultantes das combinações possíveis entre eles.

Em seu artigo de 1964, no qual há maior detalhamento da metodologia proposta, Hammond empregou cartas topográficas 1:250.000 e fez uma análise por trechos do terreno, denominados por ele de “quadrados de medição” (*roving-window*) e mais tarde, por Dikau, Brabb e Mark (1991), de “janelas móveis” (*moving-window*). Esses quadrados tinham lados com 9,65 km, tamanho escolhido após alguns testes por englobar bem uma grande variedade das formas de relevo encontradas na área. Hammond (1964) destaca que o tamanho da “janela móvel” deve ser testado para cada área de trabalho, pois é importante que não seja tão pequeno para cortar encostas individuais ao meio e assim deixar de representar uma feição ou forma, como uma montanha e nem tão grande para incluir áreas de diversidade excessiva, generalizando o relevo local.

Hammond (1964) moveu sua janela em intervalos de 9,65 km, não havendo sobreposição. Em cada janela, o autor estimou a porcentagem da área em que o declive era plano ou suave (inferior a 8%, 4 classes), amplitude (elevação máxima menos a mínima, 6 classes), e o tipo de perfil do relevo expresso como porcentagem relativa de áreas planas ou de inclinação suave que ocorrem em planícies ou planaltos (4 classes).

A combinação desses parâmetros poderia gerar um máximo de 96 classes de formas de relevo, mas sabendo que cerca de metade delas não ocorriam em sua área de estudo, Hammond (1964) utilizou apenas 45 classes em seu mapa. O autor ainda fundiu áreas menores que 2.072 km² em classes adjacentes para uma generalização das informações no seu mapa final em escala 1:5.000.000 de todo os Estados Unidos .

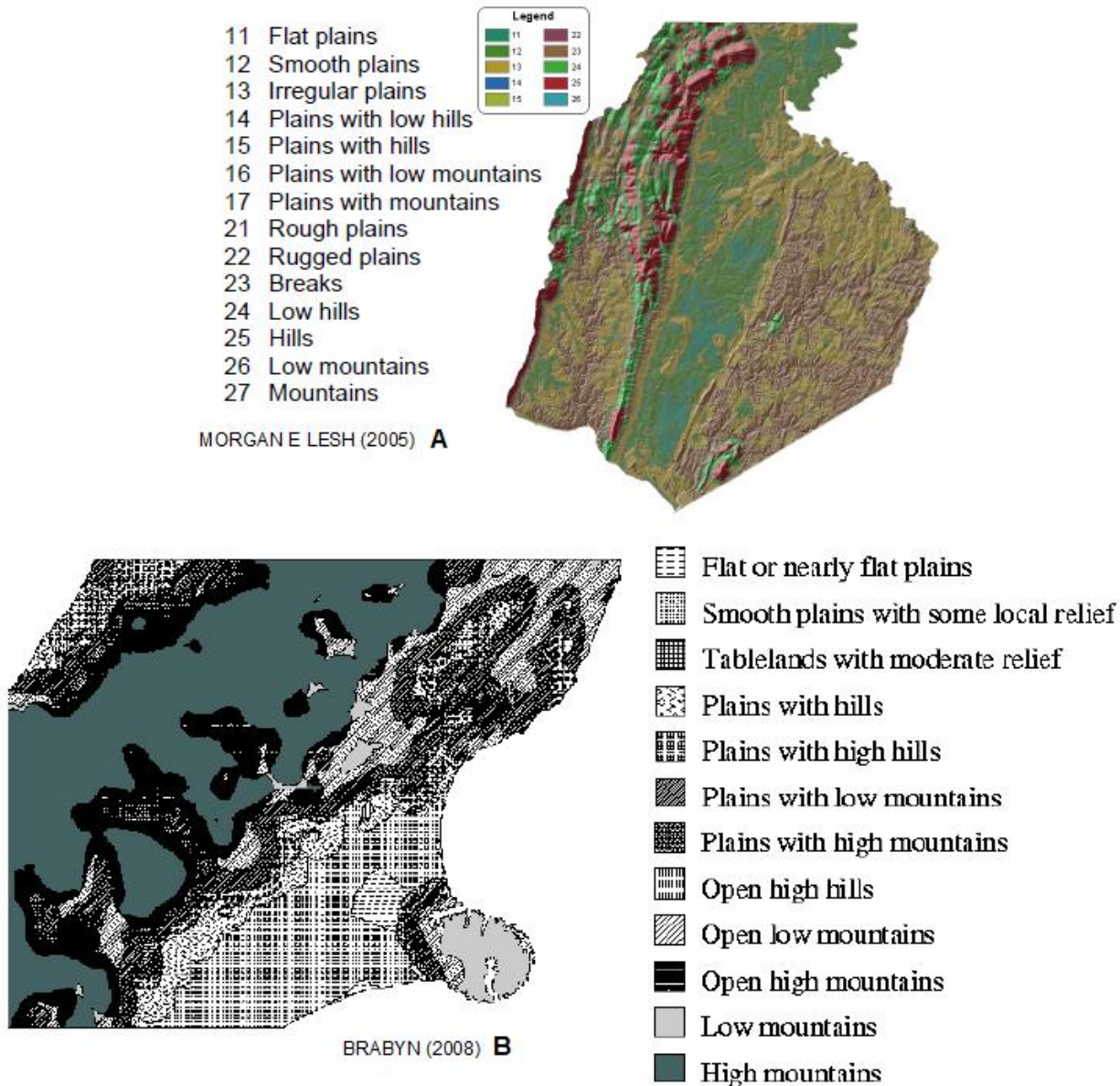
A metodologia de classificação das formas de relevo desenvolvida por Hammond (1954, 1964) tem sido empregada e adaptada para o mapeamento de muitas áreas do planeta. Dentre as adaptações, destaca-se a elaborada por Dikau, Brabb e Mark (1991), que com os avanços tecnológicos e o surgimento dos Sistemas de Informação Geográfica, automatizaram e retificaram os procedimentos dessa metodologia.

Utilizando o mesmo processo de "janelas móveis", mas por meio de algoritmos baseados em operadores locais (filtros espaciais), Dikau, Brabb e Mark (1991), desenvolveram novos procedimentos digitais para a classificação do relevo no Novo México (EUA). Com base no trabalho de Hammond (1954, 1964), utilizando os mesmos parâmetros e tendo como fonte básica de informação um MDE de 200x200m² de resolução, os resultados obtidos foram muito mais precisos, permitindo sua exploração em escalas maiores (como 1:200.000 ou 1:100.000).

A classificação automatizada das formas de relevo reproduziu os procedimentos executados por Hammond (1964) e alcançou resultados comparáveis aqueles obtidos por meio de métodos analógicos tradicionais. Além disso, se mostrou versátil, permitindo a melhoria e adaptação à áreas específicas. A partir dos trabalhos de Dikau, (1990), Dikau, Brabb e Mark (1991) e Schmidt e Dikau (1999), essa metodologia foi aplicada por diversos autores com pequenas modificações para a obtenção de resultados satisfatórios. Em âmbito internacional, destacam-se os trabalhos de Dikau et al. (1995), Brabyn (1996, 1998), Martínez-Zavala et al. (2005, 2007), Morgan e Lesh (2005). No entanto, ainda não há registros de publicações com a aplicação dessa classificação em

território brasileiro. A Figura 12 ilustra os resultados obtidos nos trabalhos de Brabyn (1998) e Morgan e Lesh (2005).

Figura 12. Resultados obtidos em trabalhos que empregaram a metodologia proposta por Hammond (1954, 1964) e adaptada por Dikau, Brabb e Mark (1991).

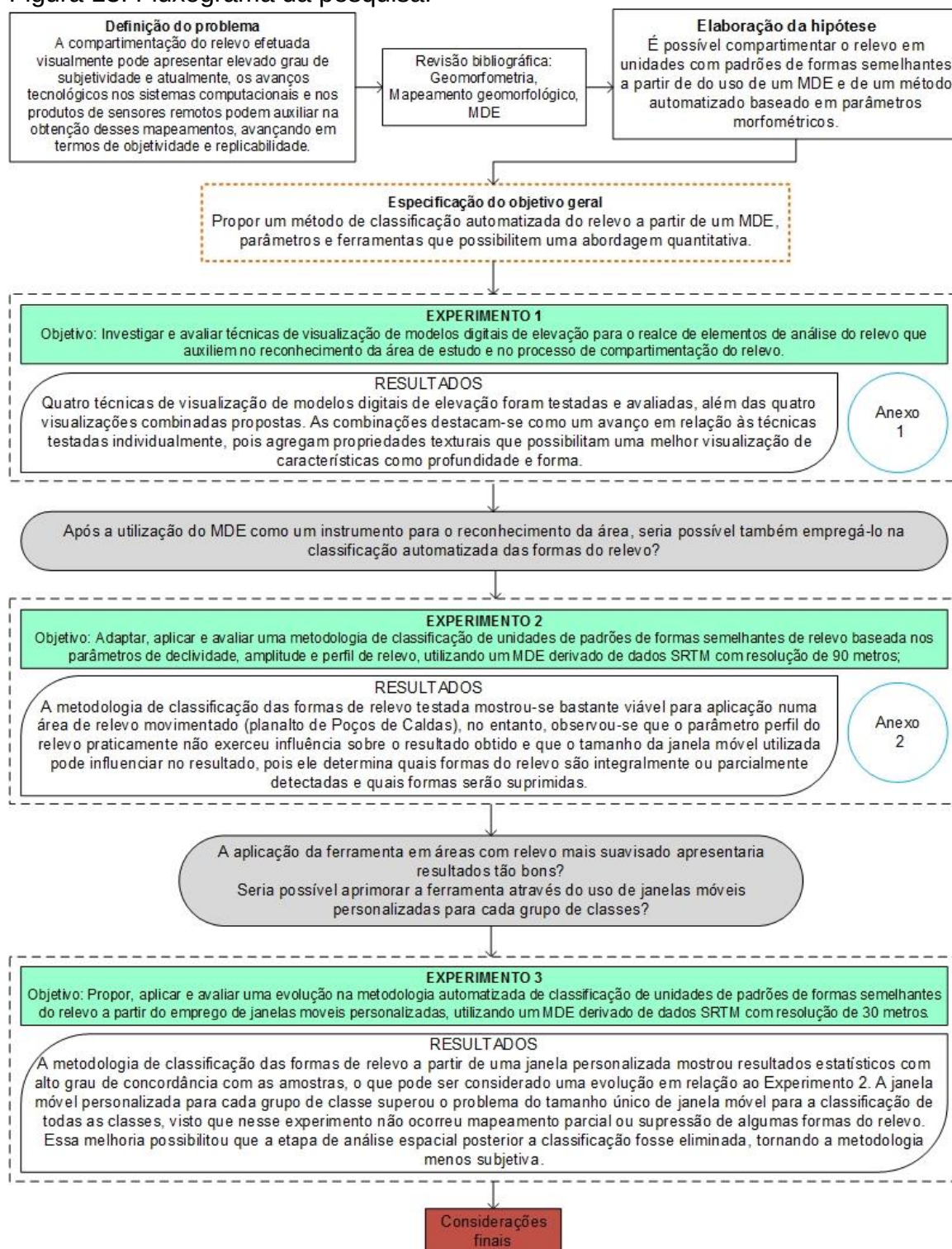


Fonte: A. MORGAN e LESH (2005); B. BRABYN (1998)

5 MATERIAIS E MÉTODOS

A estrutura geral do trabalho pode ser visualizada na Figura 13.

Figura 13. Fluxograma da pesquisa.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1 Revisão bibliográfica

Durante qualquer pesquisa bibliográfica necessita-se de um roteiro cuidadoso para delimitar, identificar e definir o fenômeno ou matéria que está sendo objeto de estudo. Segundo Oliveira (2002), tal roteiro envolve: seleção de fontes de referência (índices, bibliografias); levantamento completo do material publicado sobre o assunto; consultas a especialistas e estudiosos; e acesso a acervos e centros de pesquisa digital (via Internet).

Tendo isso em vista, os dados foram coletados nos acervos das bibliotecas da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP e da Universidade de São Paulo – USP, e principalmente nos acervos bibliográficos *online* nacionais e internacionais, bem como bases de dados textuais e referências de consulta a periódicos.

Foi realizada uma seleção de obras que englobam as temáticas: geomorfologia, mapeamento geomorfológico, geomorfometria, parâmetros geomorfométricos, sensoriamento remoto, modelo digital de elevação, formas do relevo, compartimentação fisiográfica, classificação automática do relevo e aspectos físicos do planalto de Poços de Caldas – MG e da bacia hidrográfica do rio Corumbataí.

A revisão bibliográfica foi efetuada em todas as etapas, de modo a subsidiar o embasamento e a compreensão do processo de classificação do relevo e dos resultados obtidos.

5.2 Seleção do software e aquisição/organização dos produtos de sensoriamento remoto e dos produtos cartográficos

Para a realização do trabalho foi empregado o software ArcGIS 10.1 (ESRI, 2011), que foi selecionado por abranger um conjunto de ferramentas que atendem aos procedimentos propostos.

Os modelos digitais de elevação utilizados foram os dados SRTM. Esse tipo de dado foi selecionado por destacar-se como um material gratuito e de fácil acesso. Os dados SRTM podem ser obtidos diretamente no *site* da NASA ou através de inúmeras instituições que já realizaram algum tipo de processamento nos dados, objetivando

correções no modelo. Aqui no Brasil, destacam-se os SRTM disponibilizados pela EMBRAPA (Brasil em Relevo) e pelo INPE (TOPODATA).

Nos experimentos 1 e 2 foram utilizados dados SRTM com resolução de 90 metros adquiridos no site da organização *Global Land Cover Facility* – GLCF (<http://glcf.umd.edu/>), vinculada a *University of Maryland* – EUA (USGS, 2004). Foram realizados testes prévios com os SRTM obtidos na EMBRAPA e no INPE, no entanto os resultados não foram satisfatórios para as áreas testadas. No geral, todos os modelos apresentaram algum tipo de ruído, mas o modelo *Filled Fineshed-A*, processado pela GLCF, foi o que apresentou o menor nível, além de ter algumas falhas de imageamento removidas.

Já as cartas topográficas, empregadas para a validação dos resultados no experimento 2, foram adquiridas através do site do IBGE que disponibiliza inúmeras bases já vetorizadas.

No experimento 3 foram utilizados dados SRTM com resolução de 30 metros adquiridos através da página *Earth Explorer* (<http://earthexplorer.usgs.gov/>), administrada pelo *U.S. Geological Survey* (USGS). Esse dado foi disponibilizado gratuitamente em setembro de 2014 apenas por essa instituição. Esse produto passou por um pré-processamento denominado de *Void Filled*, que consiste no preenchimento de vazios nas imagens.

Os materiais utilizados nos 3 experimentos são apresentados no Quadro 6.

Quadro 6. Materiais utilizados nos experimentos.

Experimentos	Materiais	Ano	Escala ou Resolução	Fonte
Experimentos 1 e 2	SRTM, 3 Arc Second scene, Filled Finished-A SRTM_ff03_s022w046, SRTM_ff03_s022w47 SRTM_ff03_s23w047	2006	Resolução de 90 metros	Global Land Cover Facility
	Cartas topográficas vetorizadas Poços de Caldas, Caldas, Pinhal, Santa Rita de Caldas, Aguai e São João da Boa Vista	1972	1:50.000	IBGE
	Imagem SPOT 5 pancromática	2006	Resolução de 2,5 metros	Prefeitura Municipal de Poços de Caldas

Continua na próxima página.

Experimentos	Materiais	Ano	Escala ou Resolução	Fonte
Experimento 3	SRTM, 1 Arc-Second scene SRTM1S23W048V3	2014	Resolução de 30 metros	Earth Explorer U.S. Geological Survey
	Mosaico de imagens do serviço Bing Maps	2010 e 2011	Resolução de 0,5 metros	Bing Maps Microsoft

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Experimentos

A estrutura da tese baseia-se em três experimentos, os quais resultaram em dois artigos científicos já publicados que são apresentados nos Anexos 1 e 2, e um terceiro artigo que está em fase de preparação. Os experimentos são correlacionados e mostram a evolução da construção de uma metodologia de classificação automatizada do relevo.

O desenvolvimento dos experimentos se deu, de modo geral, em quatro etapas:

- Etapa 1 - Definição do problema e dos objetivos do experimento

Esta etapa compreendeu a definição do problema a ser investigado e do objetivo a ser alcançado no experimento. A partir disso, ocorreu a pesquisa e seleção de conceitos, parâmetros e ferramentas já existentes para a solução do problema.

- Etapa 2 - Desenvolvimento do experimento

Esta etapa envolveu a elaboração de um projeto para a operacionalização dos conceitos na plataforma ArcGIS. Algumas ferramentas foram desenvolvidas ou melhoradas para o cálculo dos parâmetros geomorfométricos e para o processo de classificação do relevo. As ferramentas foram ajustadas e refinadas por meio de sucessivas aplicações e avaliações dos resultados.

- Etapa 3 – Avaliação e validação dos resultados

Nesta etapa os resultados foram avaliados e validados através de análise estatística, dados de referência obtidos em trabalhos de campo e comparação com outros mapeamentos já desenvolvidos na área.

- Etapa 4 - Redação e correção do(s) artigo(s) científicos

Esta etapa foi dedicada à seleção dos periódicos, redação e submissão dos artigos, além do acompanhamento do processo de avaliação do artigo submetido, realização das possíveis correções e ajustes solicitados pelos revisores.

A seguir são apresentados os métodos empregados e as justificativas para a realização de cada experimento.

5.3.1 Experimento 1

O Experimento 1 foi pensado na fase inicial da pesquisa, quando foram estudados os modelos digitais de elevação (MDE), suas aplicações, suas formas de visualização e os diferentes produtos gerados. O artigo “Técnicas de visualização de modelos digitais de elevação para o reconhecimento de elementos de análise do relevo” foi elaborado, aceito e publicado na Revista Geociências, v. 33, n. 2, p.202-215, 2014 e está disponível no Anexo A.

No geral, os MDEs podem ser visualizados por meio de uma escala de cor, mas esse tipo de visualização não possibilita a representação de feições sutis do terreno. Então, muitos usuários recorrem à técnica de relevo sombreado, que destaca essas variações sutis da topografia e permite uma interpretação mais próxima do real da área estudada. No entanto, Bonham-Carter (1994) ressalta que as características do relevo podem ser melhoradas ou suprimidas pela manipulação da direção de iluminação, o que requer atenção.

Atualmente, as técnicas mais utilizadas para visualização dos MDEs são a elevação em escala de cor e o relevo sombreado. Enquanto a primeira promove o destaque das áreas com diferentes altitudes, a segunda destaca as formas do relevo. No entanto, como já explicitado, o relevo sombreado é altamente dependente do viés da fonte de iluminação, o que pode levar a interpretações distorcidas das feições de relevo. Buscando aprimorar a visualização, Onorati et al. (1992) recomendaram que fossem utilizadas pelo menos duas direções de iluminação, sendo uma paralela e outra perpendicular a direção predominante do relevo. Contudo essa técnica não produz apenas um produto para visualização e também não resolve todos os problemas do viés da iluminação.

Smith e Clark (2005) realizaram um estudo que compara diversas técnicas de visualização das formas do relevo em modelos digitais de elevação e concluíram que não é possível gerar um produto único que não tenha a interferência da iluminação e carregue ainda o realce das formas do relevo. Os autores recomendam então que, em um mapeamento, inicialmente se opte por uma técnica que não dependa da iluminação. Smith e Clark (2005) destacam como solução o uso em conjunto das técnicas de curvatura em perfil, declividade e realce por filtro adaptativo. Do ponto de vista metodológico, essas técnicas fornecem uma boa representação da superfície independente do ângulo de iluminação.

Neste experimento, discutem-se alguns dos problemas relacionados à interpretação dos modelos digitais de elevação e analisam-se algumas técnicas sugeridas por Smith e Clark (2005) para executar uma visualização mais completa e não induzida pelos efeitos da iluminação. Tem-se como objetivo testar quatro técnicas de visualização dos MDEs – curvatura em perfil, declividade, realce por filtro adaptativo e relevo sombreado – além de quatro visualizações combinadas. Por fim, apresenta-se uma avaliação dos produtos gerados e uma recomendação da melhor técnica de visualização dos modelos digitais de elevação para o realce de cada elemento de análise do relevo.

Abaixo segue a descrição dos procedimentos executados nesse experimento:

A. Seleção do software e aquisição/correção do SRTM

Como já explicitado anteriormente, neste experimento foram utilizados os dados SRTM no modelo *Finesshed filled* processado pela GLCF, pois apresentaram o menor nível de ruído e tiveram algumas falhas de imageamento removidas.

Após a aquisição do SRTM, é recomendada a verificação de valores discrepantes (*outliers*) para a validação do modelo. Reuter et al. (2008) discutem diversas abordagens para eliminar e reduzir erros e ruídos em diversos tipos de modelo digital de elevação. Dentre as sugestões apresentadas, as que se aplicam ao produto selecionado e são passíveis de correção sem informação adicional são a redução de valores discrepantes e o preenchimento de micro-bacias.

Para a área estudada utilizou-se a metodologia apresentada por Felícisimo (1994) para a redução de valores discrepantes. Esta metodologia busca pixels com valores

discrepantes da média de seus pixels vizinhos por meio de uma janela móvel de 3x3 pixels. A princípio verificou-se que não havia ruído significativo nos SRTM adquiridos, demonstrando a boa qualidade do modelo empregado. As poucas áreas de discrepância encontradas foram identificadas como picos e vales, não sendo necessário corrigi-las. Já o preenchimento de micro-bacias se fez por meio da ferramenta *Fill*, disponível no software ArcGIS 10.1 (ESRI, 2011), de acordo com método proposto por Tarborton et al. (1991).

B. Aplicação das técnicas de visualização do MDE

Quatro técnicas sugeridas por Smith e Clark (2005) foram selecionadas para teste e avaliação nesse experimento – curvatura em perfil, declividade, realce por filtro adaptativo e relevo sombreado.

Técnica 1 - A técnica de curvatura em perfil foi aplicada através da ferramenta *Curvature*, utilizando uma janela móvel de 3x3 pixels. O resultado desse processamento foi visualizado em uma escala de cor do preto para o branco.

Técnica 2 - A declividade foi elaborada por meio da ferramenta *Slope*, utilizando também uma janela móvel de 3x3 pixels. O resultado desse processamento foi visualizado em uma escala de cor do branco para o preto.

Técnica 3 - A técnica de realce por filtro adaptativo foi aplicada através da ferramenta *Raster Calculator*, na qual foi aplicada a Equação (1), utilizando uma janela móvel de 10x10 pixels. O resultado desse processamento foi visualizado em uma escala de cor do branco para o preto.

$$X = \frac{MDE - MinMDE}{MaxMDE - MinMDE}$$

(1)

Técnica 4 - Por fim, a técnica de relevo sombreado foi implementada por meio da ferramenta *Hillshaded* utilizando uma janela móvel de 3x3 pixels. A escolha dos azimutes de iluminação foi realizada de acordo com Wise et al. (1985) que sugerem que o relevo é mais claramente visualizado quando iluminado a partir de uma direção ortogonal à tendência principal de lineamentos. No Planalto de Poços de Caldas, segundo o estudo de Moreira et al. (2007), a direção predominante dos lineamentos é 140° (NW-SE), assim

a direção ideal do azimuth de iluminação para a visualização do relevo seriam 50° ou 230°. Nesse estudo, optou-se pelo azimuth de 50° pois esse ressaltou as principais vertentes do dique anelar que circunda o planalto de Poços de Caldas. Como complemento ao relevo sombreado 50°, foi gerado um segundo relevo sombreado com azimuth de 320° por ser perpendicular ao primeiro. Para os dois produtos adotou-se 20° como ângulo de elevação da fonte de iluminação. Os resultados desse processamento foram visualizados em uma escala de cor do preto para o branco.

C. Experimentação com visualizações combinadas

Quatro visualizações combinadas foram experimentadas conforme descrito a seguir. As visualizações combinadas 1 e 2 tiveram o objetivo de acrescentar um elemento textural ao MDE, enquanto as visualizações combinadas 3 e 4 tiveram como foco a representação das formas do relevo com a menor interferência possível do viés de iluminação.

Visualização combinada 1 - Já bastante conhecida, essa visualização combinada é constituída pelo modelo digital de elevação (em uma escala de cores) e pelo produto obtido com a técnica 4 (relevo sombreado com azimuth de 50°) sobrepostos com um nível de transparência de 40%.

Visualização combinada 2 - Essa segunda combinação é formada pelo modelo digital de elevação (em uma escala de cores) e pelo produto obtido com a técnica 2 (declividade com a escala de cores do branco para o preto) sobrepostos com um nível de transparência também de 40%.

Visualização combinada 3 - Na terceira visualização combinada foram empregados os dois produtos resultantes da técnica 4, ou seja, os relevos sombreados com azimuthes de iluminação paralelo (320°) e ortogonal (50°) para um destaque das feições do relevo. Uma composição colorida foi realizada e o relevo sombreado de azimuth 50° foi inserido no canal vermelho e o relevo sombreado de azimuth 320° nos canais verde e azul. Dessa forma, as vertentes direcionadas para o ângulo de 320° aparecem em tonalidades de azul enquanto as vertentes direcionadas para o ângulo 50° aparecem em tons de vermelho e as áreas planas em tons de cinza.

Visualização combinada 4 - A quarta combinação envolve do produto gerado pela técnica 2 e os produtos resultantes da técnica 4, ou seja, a declividade (com a escala de cores do branco para o preto) e os relevos sombreados com azimutes de iluminação paralelo (320°) e ortogonal (50°). Uma nova composição colorida foi elaborada e a declividade foi inserida no canal vermelho, o relevo sombreado de azimute 50° foi inserido no canal verde e o relevo sombreado de azimute 320° no canal azul. Na figura resultante desse processo, as vertentes direcionadas para o ângulo de 320° aparecem com tonalidades de azul, as vertentes direcionadas para o ângulo 50° aparecem em tons de verde e as áreas planas são visualizadas em tons claros de vermelho.

D. Avaliação dos produtos a partir de elementos de análise do relevo

Os produtos gerados através das quatro técnicas e das quatro visualizações combinadas foram avaliados de acordo com alguns elementos de análise do relevo (Quadro 7) propostos por Howard (1965), Soares e Fiori (1976) e IBGE (2009). Em cada produto buscou-se determinar os elementos de análise passíveis de identificação e por fim, sugerem-se os melhores produtos para o estudo de cada um dos elementos de análise do relevo.

Quadro 7. Elementos de análise do relevo e suas respectivas classes de análise.

Classes de análise	Elementos de análise
Análise da densidade textural	Densidade dos elementos de drenagem
	Densidade dos elementos do relevo
Análise das características do relevo	Amplitude local
	Declividade
Análise das estruturas geológicas	Linhas de rupturas de declive
	Lineamentos e alinhamentos de relevo
	Padrões de drenagem

Fonte: Elaborado pelo autor.

Destaca-se que esses elementos foram selecionados por serem compatíveis com a escala de trabalho. Outros elementos propostos pelos autores citados como forma de vertente e forma e extensão dos topos não foram considerados, pois não podem ser visualizados com precisão na escala do modelo derivado de dados SRTM. No entanto, em trabalhos que utilizem modelos derivados de dados com maior nível de detalhe, esses elementos podem ser incluídos para a avaliação.

5.3.2 Experimento 2

Após os resultados obtidos no Experimento 1, observou-se as potencialidades dos MDEs e optou-se por empregá-los também na classificação automatizada do relevo. O foco do Experimento 2 foi analisar a substituição de alguns processos interpretativos e subjetivos por procedimentos quantitativos relativos à geomorfometria do terreno no mapeamento de padrões de formas semelhantes do relevo. O artigo “Aplicação e avaliação de metodologia de classificação automática de padrões de formas semelhantes do relevo” foi elaborado, aceito e publicado na Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 15, n. 3, p.353-370, 2014 e está disponível no Anexo B.

Foram pesquisadas diversas metodologias e abordagens de classificação automatizada do relevo, mas dentre os trabalhos analisados, a metodologia proposta por Hammond (1954, 1964) foi selecionada para a aplicação no Experimento 2 por empregar parâmetros geomorfométricos consagrados em muitos mapeamentos e por resultar em unidades que apresentam uma contiguidade espacial representativa do relevo. Além disso, Hammond (1954, 1964) almejava com sua metodologia promover a objetividade na classificação das características do relevo e, com isso, garantir a comparabilidade dos resultados obtidos por diferentes pesquisadores.

Planejando mapear o relevo de grandes áreas e com poucos dados disponíveis, Hammond (1954, 1964) selecionou parâmetros que representassem satisfatoriamente a geometria do relevo e que pudessem ser facilmente calculados e divididos em classes. A partir da experiência adquirida em trabalhos anteriores e de um período de testes, os parâmetros utilizados pelo autor foram: declividade, amplitude e perfil de relevo, os quais eram calculados através de “quadrados de medição” (janelas móveis) e sobrepostos a dados derivados de cartas topográficas.

Dikau, Brabb e Mark (1991) adaptaram para o ambiente computacional o sistema de Hammond (1954, 1964), utilizando modelos digitais de elevação (MDE) e ferramentas disponíveis em Sistemas de Informação Geográfica. Esta adaptação reproduziu os procedimentos executados por Hammond (1964) e alcançou resultados comparáveis àqueles obtidos por meio de métodos analógicos tradicionais. Além disso, mostrou-se versátil, permitindo a melhoria e adaptação para áreas específicas. A partir do trabalho de Dikau, Brabb e Mark (1991), essa metodologia foi aplicada por diversos autores com

pequenas modificações para a obtenção de resultados satisfatórios. Em âmbito internacional, destacam-se os trabalhos de Dikau et al. (1995), Brabyn (1996, 1998), Martínez-Zavala et al. (2005), Morgan e Lesh (2005), Martínez-Zavala et al. (2007). No entanto, ainda não há registros de publicações com a aplicação dessa classificação em território brasileiro.

Dessa forma, o objetivo desse experimento foi aplicar a metodologia de classificação das formas de relevo proposta por Hammond (1954, 1964) e adaptada por Dikau, Brabb e Mark (1991), utilizando um MDE derivado de dados SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) e avaliar os resultados obtidos para a área do planalto de Poços de Caldas (MG). Os parâmetros considerados para a classificação foram declividade, amplitude e perfil do relevo, os quais foram calculados através de janelas móveis e somados para a geração de um mapa de padrões de formas semelhantes do relevo seguindo uma legenda de intervalos de valores. Variados tamanhos de janela móvel foram testados e os resultados foram validados através de uma análise estatística a partir da matriz de erro e do coeficiente de concordância Kappa.

Abaixo segue a descrição dos procedimentos executados nesse experimento:

A. Aquisição dos dados e construção da ferramenta

Nesse experimento, os dados SRTM de aproximadamente 90 metros de resolução utilizados foram os mesmos já selecionados e corrigidos no Experimento 1. Esses dados foram empregados como base para construção do modelo digital de elevação do terreno.

Para reproduzir os passos propostos por Dikau, Brabb e Mark (1991), foi utilizado o software ArcGis 10.1 (ESRI, 2011) e as seguintes ferramentas foram combinadas através da interface do *Modelbuilder*: *Slope*, *Reclassify*, *Focal Statistic*, *Raster Calculator*, *Majority Filter*, *Region Group*, *Nibble* e *Raster to Polygon*. Todos os detalhes da configuração da ferramenta criada e o seu download para outros usuários estão disponíveis no seguinte link: <http://sdrv.ms/14lF3iZ>.

B. Teste das janelas móveis e cálculo dos parâmetros

A metodologia de classificação do relevo baseia-se em uma janela móvel, que tem tamanho variável, de acordo com a escala de trabalho e as formas de relevo a serem mapeadas. Essa etapa consistiu em testar janelas de 5X5, 10X10, 15X15, 20X20, 30X30 e 40X40 pixels para o cálculo dos parâmetros Declividade, Amplitude e Perfil, conforme proposto por Hammond (1954):

O cálculo do parâmetro de Declividade foi realizado a partir dos dados derivados do SRTM. Foi gerado um mapa de declividade com duas classes, sendo classe 1 ($\text{dec} < 8\%$) e classe 2 ($\text{dec} > 8\%$). Em seguida, foi calculada para cada pixel a porcentagem de declividade suave ($\text{dec} < 8\%$) em seu entorno, por meio da janela móvel. Dessa forma, o parâmetro de declividade representa a porcentagem de declividade suave dentro de um raio de busca (HAMMOND, 1954). O mapa de porcentagem de declividade suave foi classificado em 4 classes, de acordo com a Tabela 1 e é apresentado na Figura 14A.

Tabela 1. Classes do parâmetro de Declividade propostas por Hammond (1954) e adaptadas por Dikau, Brabb e Mark (1991).

Classes	Intervalo de quantidade de declividade suave (em %)	Valor reclassificado
Classe 1	0 – 20	100
Classe 2	20 – 50	200
Classe 3	50 – 80	300
Classe 4	80 – 100	400

Fonte: Dikau, Brabb e Mark (1991).

O valor de 8% de declividade foi estabelecido pela experiência do autor, adquirida em trabalhos anteriores, e por ser um valor mundialmente usado, principalmente na agricultura, para separar terrenos planos ou ondulados de terrenos mais movimentados, conforme citado por Wassmann e Vlek (2004). Aqui no Brasil, a EMBRAPA (1979) e o IBGE (2009) também empregam 8% de declividade como limiar para classificar terrenos entre planos a suavemente ondulados, onde há predomínio da pedogênese sobre a morfogênese.

Para o parâmetro de Amplitude local do terreno, também chamado de Relevo Local por Hammond (1954, 1964) foram calculados para cada pixel os valores mínimo e

máximo de elevação dentro da janela móvel. Em seguida, realizou-se a subtração do mínimo em relação ao máximo. O produto então foi reclassificado em 6 classes, de acordo com a Tabela 2. A Figura 14B apresenta o mapa resultante desse processamento.

Tabela 2. Classes do parâmetro Amplitude (relevo local) propostas por Hammond (1954) e adaptadas por Dikau, Brabb e Mark (1991).

Classes	Intervalo de amplitude (em metros)	Valor reclassificado
Classe 1	0 - 30	10
Classe 2	30 – 90	20
Classe 3	90 - 150	30
Classe 4	150 - 300	40
Classe 5	300 - 900	50
Classe 6	900 - 9999	60

Fonte: Dikau, Brabb e Mark (1991).

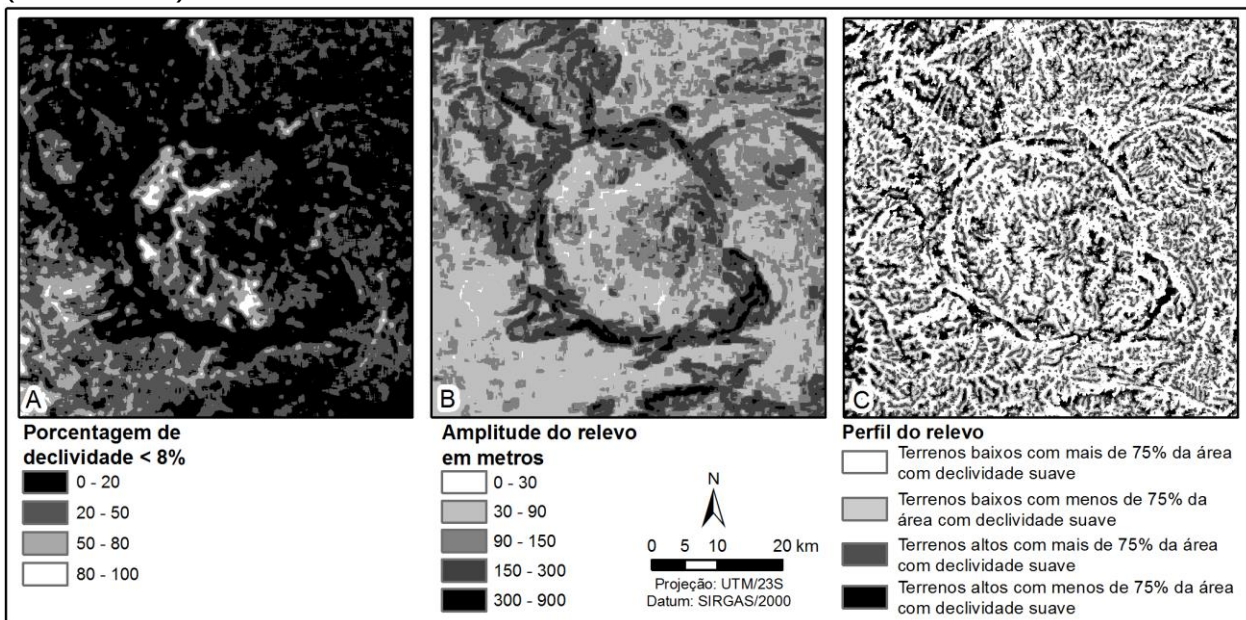
Para o cálculo do parâmetro de Perfil do Relevo foi necessário inicialmente encontrar os terrenos altos e baixos. Terrenos altos são definidos como áreas em que a máxima elevação dentro da janela móvel, menos a elevação do ponto central da janela é menor que metade da Amplitude (relevo local). Terrenos baixos são definidos como áreas em que a máxima elevação dentro da janela, menos a elevação do ponto central da janela é maior que metade da Amplitude (relevo local) (HAMMOND, 1954). Em seguida, foi calculada a porcentagem de declividade suave ($\text{dec} < 8\%$) no interior dos terrenos altos e baixos. A Tabela 3 apresenta as classes de perfil de relevo propostas por Hammond (1954) e o mapa de perfil do relevo é mostrado na Figura 14C.

Tabela 3. Classes do parâmetro Perfil do Relevo propostas por Hammond (1954), adaptadas por Dikau, Brabb e Mark (1991).

Classes	Descrição da classe de perfil	Valor reclassificado
Classe 1	Terrenos baixos com mais de 75% da área com declividade suave.	1
Classe 2	Terrenos baixos com menos de 75% da área com declividade suave.	2
Classe 3	Terrenos altos com mais de 75% da área com declividade suave.	3
Classe 4	Terrenos altos com menos de 75% da área com declividade suave.	4

Fonte: Dikau, Brabb e Mark (1991).

Figura 14. Representação dos parâmetros calculados. A – Declividade, B - Amplitude (relevo local), C - Perfil de Relevo.



Fonte: Elaborado pelo autor

C. Elaboração do Mapa preliminar de padrões de formas semelhantes do relevo

Os parâmetros de declividade, amplitude local e perfil do relevo foram somados para gerar mapas de padrões de formas semelhantes do relevo para os vários tamanhos de janela móvel testados. As classes foram definidas a partir da legenda proposta por Dikau, Brabb e Mark (1991), apresentada no Quadro 8, com uma coluna adicional contendo uma proposta de tradução. Optou-se por manter fidelidade à nomenclatura

utilizada em inglês, no entanto, algumas palavras foram modificadas por existirem termos mais específicos em português.

As classes identificadas se enquadram, segundo a ordem taxonômica de Ross (1990), no 3º Táxon - Unidades Morfológicas ou Padrões de Formas Semelhantes, ou seja, se definem por conjuntos de tipologias de formas que guardam entre si elevado grau de semelhança, quanto ao tamanho de cada forma e o aspecto fisionômico.

Quadro 8. Legenda para classificação do relevo propostas por Dikau, Brabb e Mark (1991).

Intervalos de valores - Mapa Hammond (1954, 1964)	Classes propostas por Dikau, Brabb e Mark (1991)	Tradução sugerida
411-414	<i>Flat or nearly flat plains</i>	Terrenos planos ou quase planos
421-424	<i>Smooth plains with some local relief</i>	Terrenos planos suavizados com algum relevo local
311-314	<i>Irregular plains with low relief</i>	Terrenos planos irregulares com relevo baixo
321-324	<i>Irregular plains with moderate relief</i>	Terrenos planos com relevo moderado
433-434, 333-334	<i>Tablelands with moderate relief</i>	Tabuleiros com relevo moderado
443-444, 343-344	<i>Tablelands with considerable relief</i>	Tabuleiros com relevo considerável
453-454, 353-354	<i>Tablelands with high relief</i>	Tabuleiros com relevo alto
463-464, 363-364	<i>Tablelands with very high relief</i>	Tabuleiros com relevo muito alto
431-432, 331-332	<i>Plains with hills</i>	Terrenos planos com colinas
441-442, 341-342	<i>Plains with high hills</i>	Terrenos planos com morros
451-452, 351-352	<i>Plains with low mountains</i>	Terrenos planos com montanhas baixas
461-462, 361-362	<i>Plains with high mountains</i>	Terrenos planos com montanhas altas
211-214	<i>Open very low hills</i>	Colinas baixas suavizadas
221-224	<i>Open low hills</i>	Colinas altas suavizadas

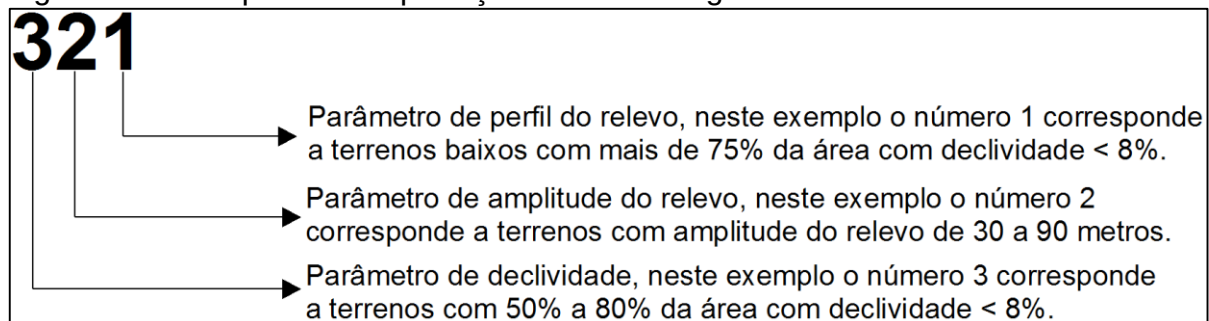
Continua na próxima página.

Intervalos de valores - Mapa Hammond (1954, 1964)	Classes propostas por Dikau, Brabb e Mark (1991)	Tradução sugerida
231-234	<i>Open moderate hills</i>	Morros baixos suavizados
241-244	<i>Open high hills</i>	Morros altos suavizados
251-254	<i>Open low mountains</i>	Montanhas baixas suavizadas
261-264	<i>Open high mountains</i>	Montanhas altas suavizadas
111-114	<i>Very low hills</i>	Colinas baixas
121-124	<i>Low hills</i>	Colinas altas
131-134	<i>Moderate hills</i>	Morros baixos
141-144	<i>High hills</i>	Morros altos
151-154	<i>Low mountains</i>	Montanhas baixas
161-164	<i>High mountains</i>	Montanhas altas

Fonte: Adaptado de Dikau, Brabb e Mark (1991).

Os valores gerados no mapa de Hammond (1954, 1964) representam códigos de cada classe e podem ser interpretados de acordo com a Figura 15.

Figura 15. Exemplo de interpretação dos valores gerados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

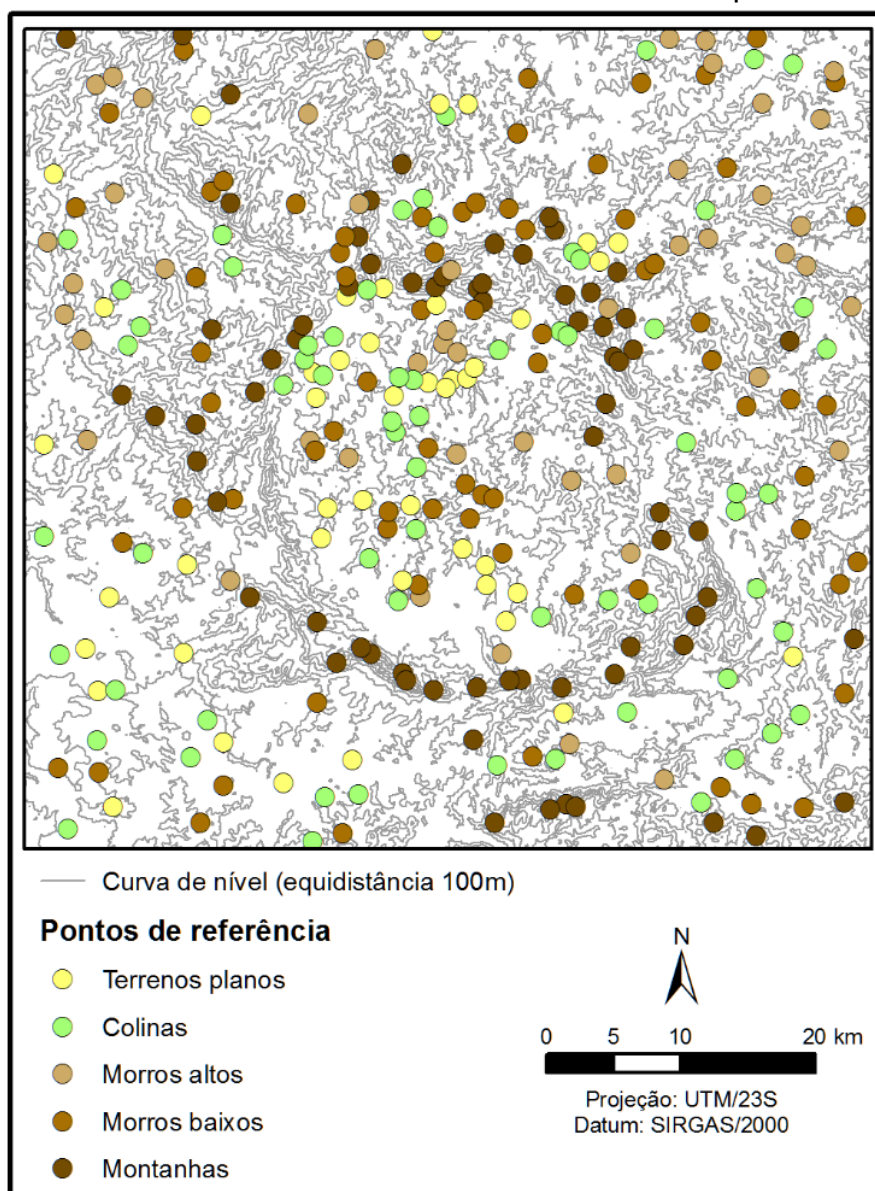
D. Validação dos resultados

A matriz de erro ou matriz de confusão e o coeficiente de concordância Kappa têm sido reconhecidos como as mais importantes técnicas de estimativa da exatidão da classificação de dados de sensores remotos. A matriz de erro é uma das formas mais eficientes de validação de uma classificação, pois permite também calcular outras medidas de exatidão, como a acurácia do usuário e a acurácia do produtor. A acurácia do usuário está relacionada aos erros de inclusão ou omissão, ou seja, pontos atribuídos a uma determinada classe oriundos de erros de classificação das outras classes. Já a

acurácia do produtor considera os erros de exclusão ou omissão, ou seja, refere-se à probabilidade de determinada classe ter sido corretamente classificada de acordo com os dados de referência (CONGALTON e GREEN, 2009).

Para a elaboração da matriz de erro e cálculo do coeficiente de concordância Kappa, foram obtidos 300 pontos amostrais dentro do limite da área de estudo, utilizando-se como método a amostragem estratificada aleatória. Os pontos amostrais, visualizados na Figura 16, foram obtidos em duas fases:

Figura 16. Pontos amostrais obtidos em trabalho de campo e escritório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

- Inicialmente foi realizado um trabalho de campo para a verificação e avaliação das classificações geradas. Devido à dificuldade em se reconhecer e diferenciar visualmente em campo todas as classes propostas na legenda de Dikau, Brabb e Mark (1991), optou-se por reuni-las, em um primeiro momento, em grupos representativos das classes de formas de relevo para a validação dos resultados. Assim, diferentes classes de relevo colinoso, por exemplo, foram reunidas em um só grupo denominado de colinas. Foram obtidos 61 pontos amostrais no trabalho de campo, abrangendo todos os grupos representativos das formas de relevo;

- Em escritório, foram adquiridos 239 pontos adicionais. Para tal, efetuou-se uma análise e identificação dos grupos de classes a partir dos seguintes materiais: cartas topográficas (curvas de nível e drenagem) na escala 1:50.000 (IBGE), imagem SPOT com resolução de 2,5m e o modelo digital de elevação derivado do SRTM. Buscou-se complementar os pontos obtidos em campo com o objetivo de totalizar o mínimo de 50 pontos por grupo de classes, conforme sugerido por Congalton e Green (2009) para o tamanho da área de estudo e pelo número de classes do mapa.

Os pontos obtidos em campo e escritório, tidos como dados de referência para a validação (CONGALTON e GREEN, 2009), foram confrontados com os resultados das classificações efetuadas para todas as janelas móveis e, em seguida, a matriz de erro foi elaborada e o cálculo do coeficiente Kappa foi realizado. Os resultados foram então categorizados segundo a escala proposta por Landis e Koch (1977), exposta na Tabela 4. Após a validação estatística e a definição da janela móvel mais adequada, foi produzido o mapa final de padrões de formas semelhantes do relevo.

Tabela 4. Qualidade da classificação segundo intervalos do coeficiente de concordância Kappa.

Valor do Kappa	Força da concordância
< 0,00	Pobre (<i>Poor</i>)
0,00 – 0,20	Fraca (<i>Slight</i>)
0,20 – 0,40	Razoável (<i>Fair</i>)
0,40 – 0,60	Moderada (<i>Moderate</i>)
0,60 – 0,80	Forte (<i>Substantial</i>)
0,80 – 1,00	Excelente (<i>Almost Perfect</i>)

Fonte: Adaptado de Landis e Koch (1977).

5.3.3 Experimento 3

Após a realização do Experimento 2, observou-se que o tamanho da janela móvel pode ser um fator limitante na classificação automatizada. Além disso, questionou-se a eficiência da metodologia em áreas de relevo mais suavizado, ou seja, nas quais o desnível altimétrico fosse menor. Assim, no Experimento 3 propõem-se a utilização de um tamanho específico de janela móvel para a geração de cada grupo ou classe de formas do relevo (janelas personalizadas) e a área de estudo nessa etapa é a bacia do rio Corumbataí.

Uma nova ferramenta foi desenvolvida a partir da ferramenta anterior, com objetivo de determinar qual seria a melhor janela para cada grupo de classes de formas do relevo e dessa forma, compor um mapa a partir de polígonos advindos das melhores janelas. Para isso a nova ferramenta executa múltiplas classificações do relevo a partir de um intervalo de dimensões de janelas fornecidos.

A. Seleção do software e aquisição/correção do SRTM

Nesse experimento, foram utilizados dados SRTM de 30 metros de resolução disponibilizados pelo *U.S. Geological Survey* em 2014 com o objetivo de avaliar se esses dados de maior detalhe produziram melhores resultados. Esses dados foram empregados como base para construção do modelo digital de elevação do terreno.

O software ArcGIS 10.1 (ESRI, 2011) foi novamente selecionado e a ferramenta desenvolvida no Experimento 2 foi modificada através de linguagem Python para a nova aplicação de janelas moveis personalizadas. Todos os detalhes da configuração da ferramenta criada e o seu algoritmo podem ser visualizados no Apêndice A.

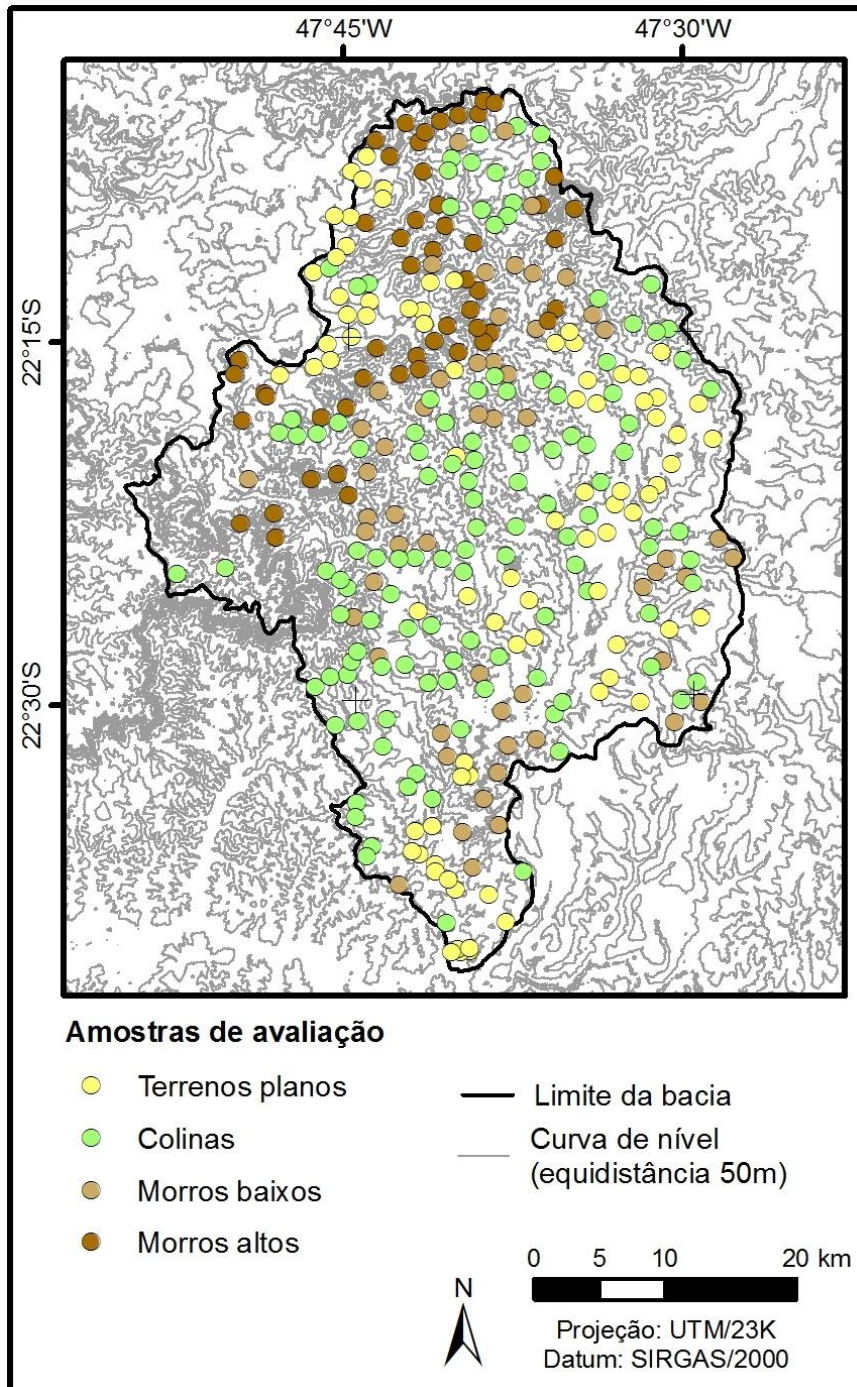
B. Classificação das formas de relevo por meio de janelas múltiplas

A metodologia proposta nesse experimento baseia-se em calcular os parâmetros declividade, amplitude e perfil do relevo em múltiplos tamanhos de janela móvel. Nesse experimento foram testadas janelas moveis entre 5X5 pixels e 150X150 pixels. Esses tamanhos foram selecionados por conseguirem englobar desde formas pequenas, como colinas, até grandes formas, como cadeias montanhosas.

Esse processamento gerou mapas de classes de formas do relevo para cada tamanho de janela, os quais ficaram armazenados no banco de dados. Para a avaliação dessas classes, elas foram agrupadas assim como no Experimento 2, ou seja, diferentes classes de relevo colinoso, por exemplo, foram reunidas em um só grupo denominado de colinas. Esses grupos de classes de formas do relevo passaram então por uma avaliação através de pontos amostrais. Foram obtidos 311 pontos em escritório a partir da análise e identificação dos grupos de classes nos seguintes materiais: mosaico de imagens do serviço Bing Maps e o modelo digital de elevação derivado do SRTM de 30 metros de resolução. Buscou-se totalizar o mínimo de 50 pontos por grupo de classes, conforme sugerido por Congalton e Green (2009) para o tamanho da área de estudo e pelo número de classes do mapa. As amostras de avaliação podem ser observadas na Figura 17.

Na avaliação foram extraídos a acurácia do produtor, que representa os erros de omissão, e a acurácia do usuário, que representa os erros de inclusão, para cada grupo de classes. Apenas o menor valor foi considerado para avaliação do desempenho de determinada janela para determinado grupo de classes. Esse passo foi imprescindível para determinar a janela com um resultado mais equilibrado entre erros de omissão e de inclusão.

Figura 17. Pontos referentes as amostras de avaliação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

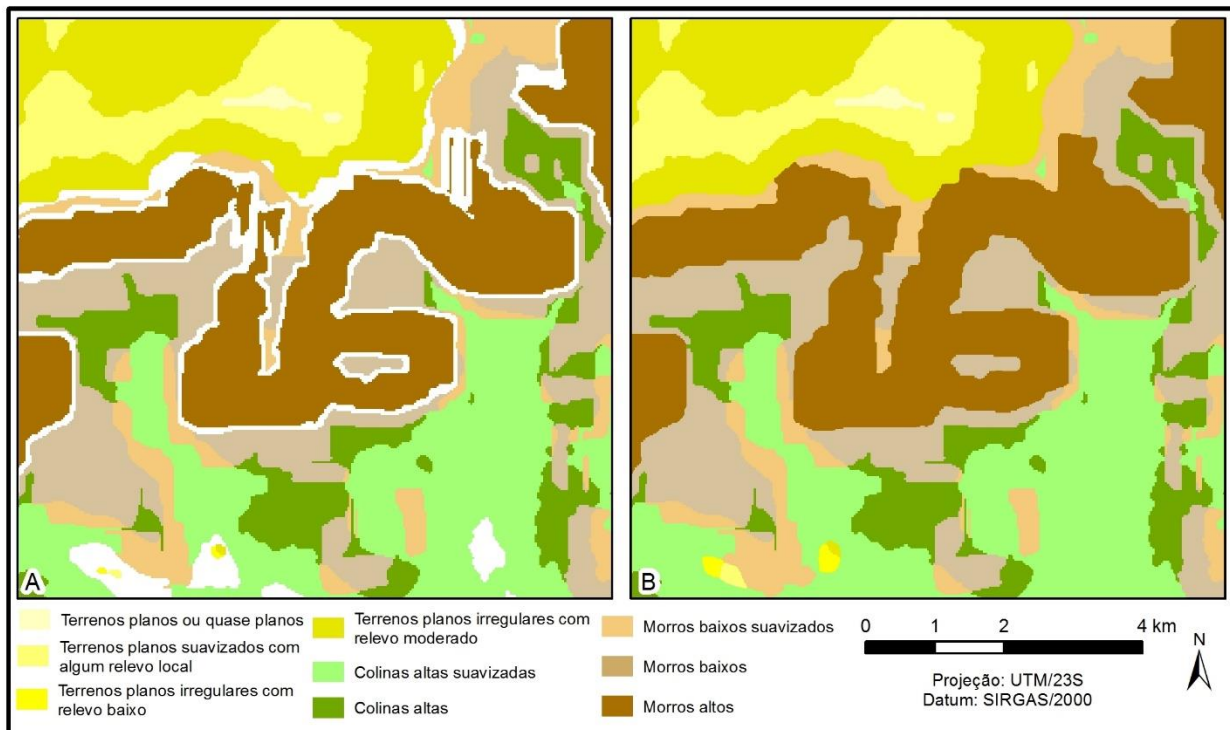
C. Elaboração do Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo

Após todas as janelas serem avaliadas e processadas, tem-se como resultado a janela em que cada grupo de classes teve o melhor desempenho. Um novo mapa de classes de formas do relevo é elaborado então a partir de um arquivo em branco de

polígonos. Nesse arquivo é realizado o mosaico dos polígonos de acordo com as janelas moveis de melhor desempenho em cada classe, em uma ordem do melhor para o pior desempenho. As áreas de sobreposições de polígonos são sempre atribuídas para o grupo de melhor desempenho. Os possíveis espaços em branco entre os polígonos são preenchidos com as classes do entorno por meio da ferramenta *Expand* e as bordas irregulares são suavizadas por meio da ferramenta *Boundary Clean*, ambas do software ArcGIS.

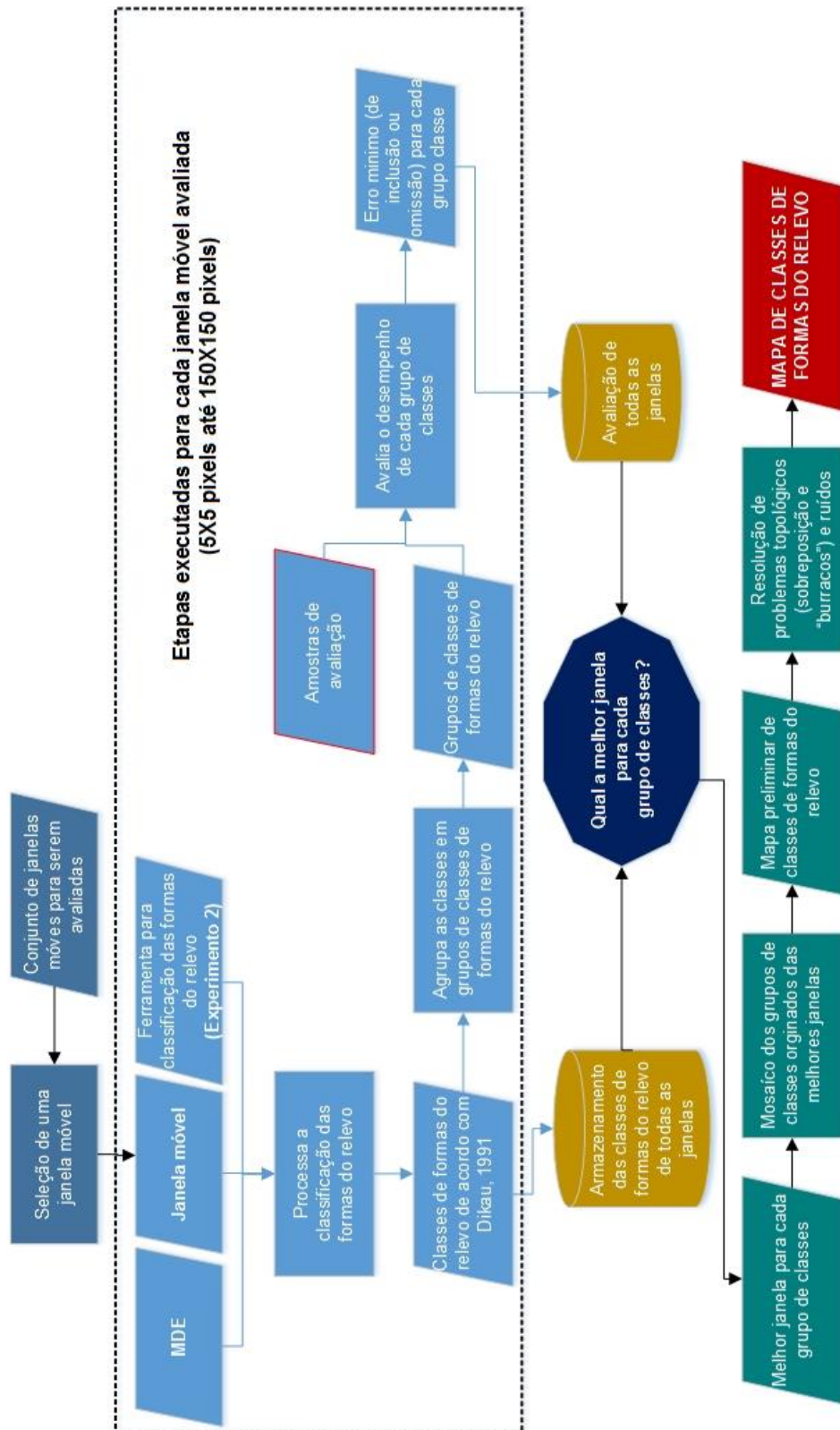
Esses espaços em branco ocorrem nos contatos entre as unidades, ou seja, em uma zona de transição de uma unidade para outra. O uso das janelas personalizadas assemelha-se a montagem de um quebra-cabeças com peças de diferentes tamanhos (janelas personalizadas), no qual inevitavelmente ocorrem “buracos”. A Figura 18 ilustra a ocorrência e o preenchimento desses espaços em branco e a Figura 19 mostra o passo a passo completo da ferramenta desenvolvida nesse experimento.

Figura 18. Área com espaços em branco originados nos contatos entre as unidades e área após o processo de preenchimento e suavização.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19. Diagrama do desenvolvimento do Experimento 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

D. Validação dos resultados

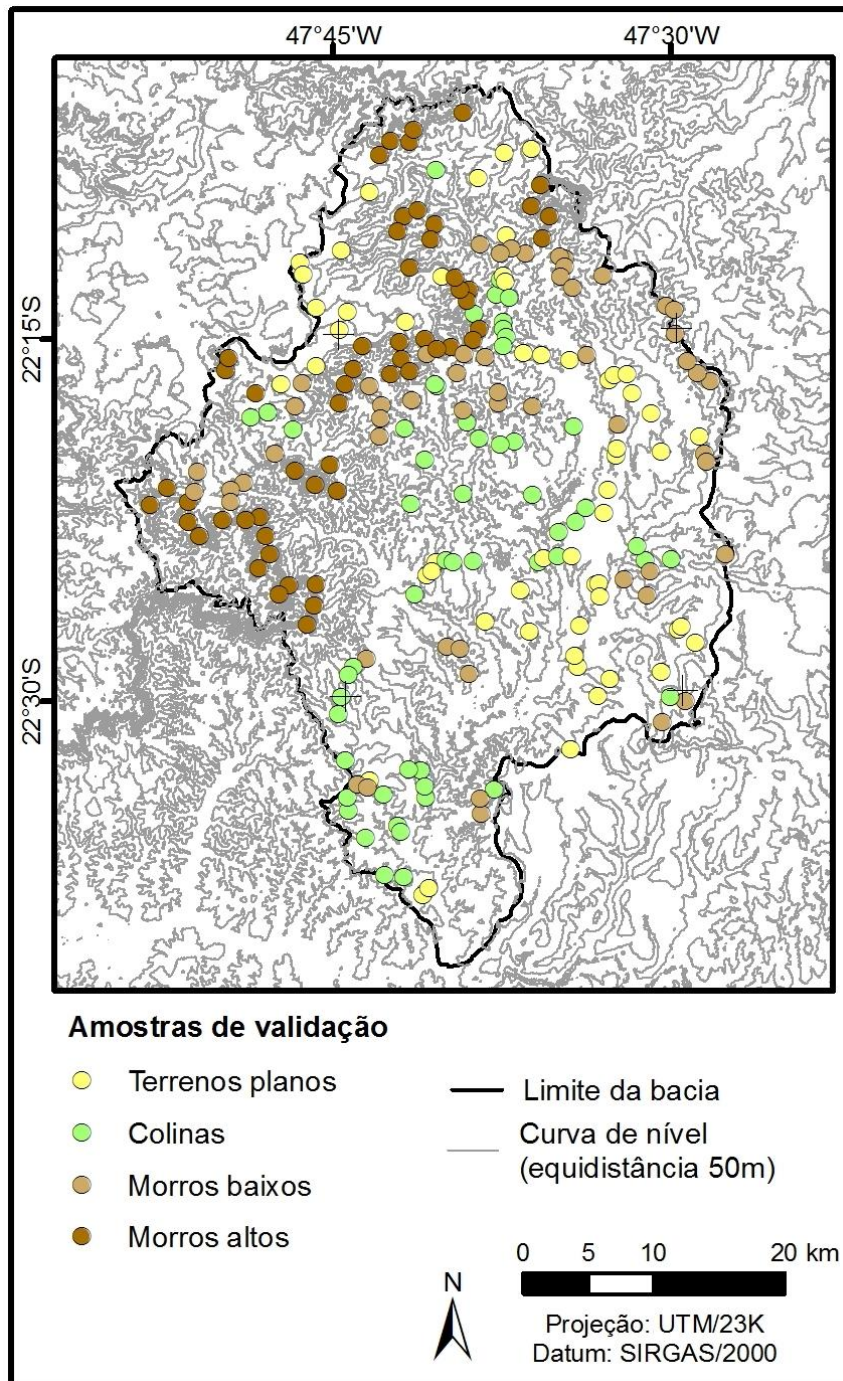
A validação dos resultados seguiu os mesmos procedimentos do Experimento 2, com a utilização da matriz de erro ou matriz de confusão e o coeficiente de concordância Kappa (CONGALTON e GREEN, 2009). Para a elaboração da matriz de erro e cálculo do coeficiente de concordância Kappa, foram obtidos 220 pontos de validação dentro do limite da área de estudo, utilizando-se como método a amostragem estratificada aleatória. Os pontos, visualizados na Figura 20, foram obtidos em duas fases:

- Inicialmente foi realizado um trabalho de campo, no qual foi verificada a ocorrência das classes de formas de relevo. Novamente, diferentes classes de relevo foram reunidas em um só grupo para essa verificação. Foram obtidos 63 pontos amostrais no trabalho de campo, abrangendo todos os grupos representativos das formas de relevo;

- Em escritório, foram adquiridos 157 pontos adicionais, diferentes dos pontos amostrais de avaliação. Para tal, efetuou-se novamente uma análise e identificação dos grupos de classes a partir dos seguintes materiais: mosaico de imagens do serviço Bing Maps e o modelo digital de elevação derivado do SRTM de 30 metros de resolução. Buscou-se complementar os pontos obtidos em campo com o objetivo de totalizar o mínimo de 50 pontos por grupo de classes, conforme sugerido por Congalton e Green (2009) para o tamanho da área de estudo e pelo número de classes do mapa.

Os pontos obtidos em campo e escritório, tidos como dados de referência para a validação (CONGALTON e GREEN, 2009), foram confrontados com os resultados das classificações efetuadas para todas as janelas móveis e, em seguida, a matriz de erro foi elaborada e o cálculo do coeficiente Kappa foi realizado. Os resultados foram então categorizados segundo a escala proposta por Landis e Koch (1977).

Figura 20. Pontos de validação obtidos em trabalho de campo e escritório.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6 RESULTADOS

6.1 Experimento 1

Como resultados do Experimento 1, apresentam-se as Figuras 21, 22, 23 e 24 que reúnem os produtos gerados nos processamentos das quatro técnicas testadas e as Figuras 25, 26 e 27 que abrangem os produtos das visualizações combinadas.

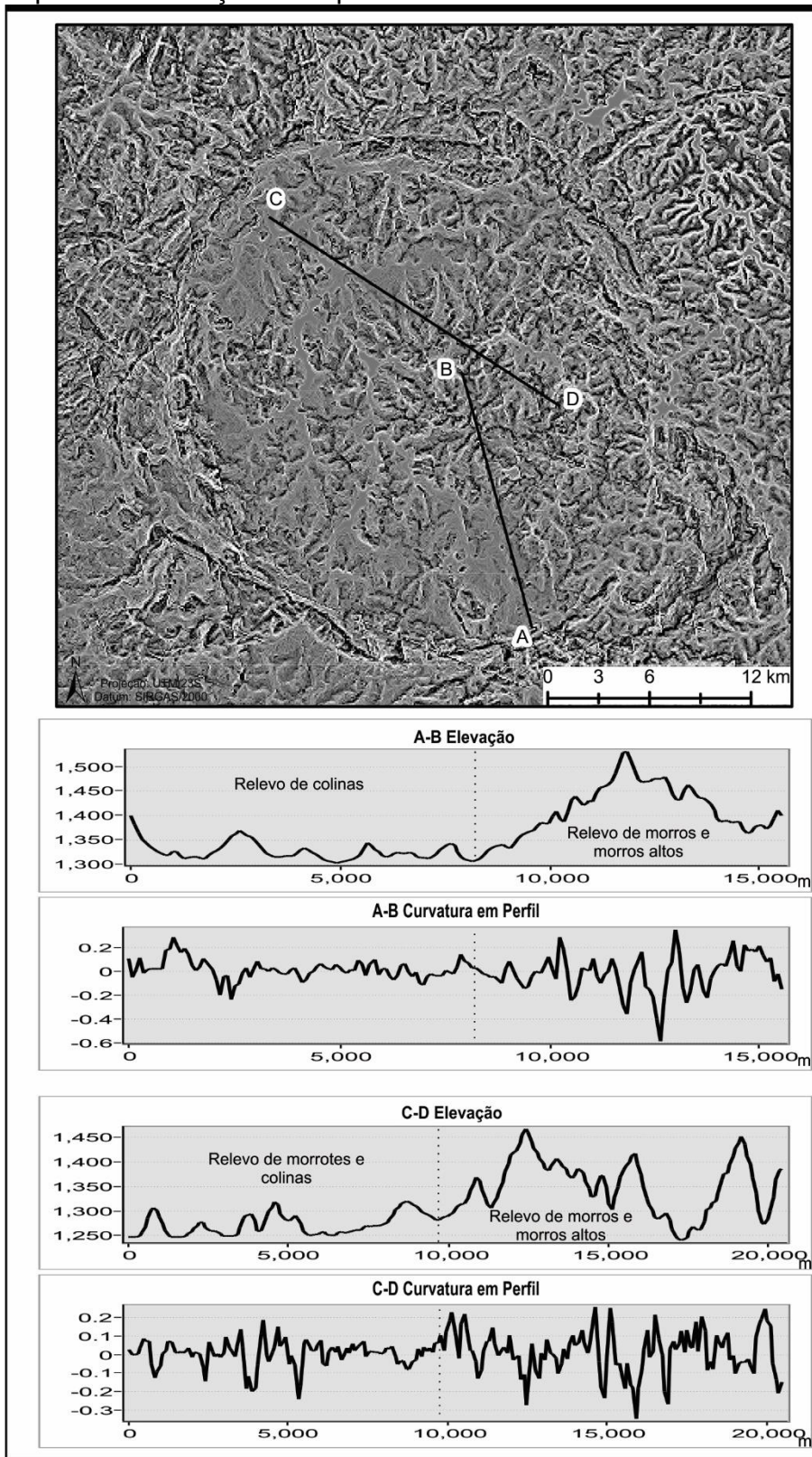
Na Figura 21 apresenta-se o produto gerado pela técnica 1, de curvatura em perfil. A principal característica desse processamento é a normalização da altitude nas imagens, ficando evidenciadas as rupturas de declive. Nota-se que, apesar da técnica estar relacionada ao caráter convexo/côncavo do terreno, não é possível distinguir as formas das vertentes visualmente, mas surge um elemento textural que possibilita a diferenciação de regiões com mais e menos textura, as quais refletem áreas com relevo mais ou menos movimentado.

Observa-se na Figura 21 que essas variações texturais possibilitam a diferenciação no interior da caldeira de zonas descritas por Chistofolletti (1972). Visualiza-se claramente uma zona em meia lua na parte ocidental do planalto de menor textura, que corresponde a uma área rebaixada onde se desenvolve uma topografia suave com relevo de morrotes e colinas. Já na porção oriental do planalto, uma zona de textura mais rugosa se destaca com topografia movimentada associada ao relevo de morros e morros altos.

Essas duas zonas de diferentes texturas podem ser melhor analisadas através dos perfis de elevação e de curvatura mostrados na Figura 21. Os perfis de elevação referentes aos trechos A-B e C-D mostram a transição de um relevo com declividades suaves e com diferença amplitude menor que 100 metros para um relevo com declividades altas e com amplitude local maior que 100 metros. Nos perfis de curvatura correspondentes, nota-se que o gráfico oscila acompanhando essa transição, ou seja, uma menor frequência ocorre para áreas com menor densidade textural enquanto que a frequência aumenta para áreas com maior densidade textural.

Foi observado durante os testes que essa técnica destacou os ruídos presentes nos dados SRTM, gerando um “efeito listrado” em algumas áreas. É preciso atentar-se para que os ruídos não interfiram na análise do produto gerado.

Figura 21. Produto resultante da técnica 1 (Curvatura em perfil) e gráficos representativos do perfil de elevação e frequência de curvatura nos trechos A-B e C-D.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 22 exibe o produto gerado a partir da técnica 2, de declividade. Apesar de bastante utilizada para a caracterização de áreas de estudo, essa técnica mostra sua importância em etapas prévias de reconhecimento do terreno graças ao efeito de profundidade obtido com a escala de cores empregada. O produto gerado tem aspecto semelhante ao relevo sombreado, mas sem a interferência da iluminação.

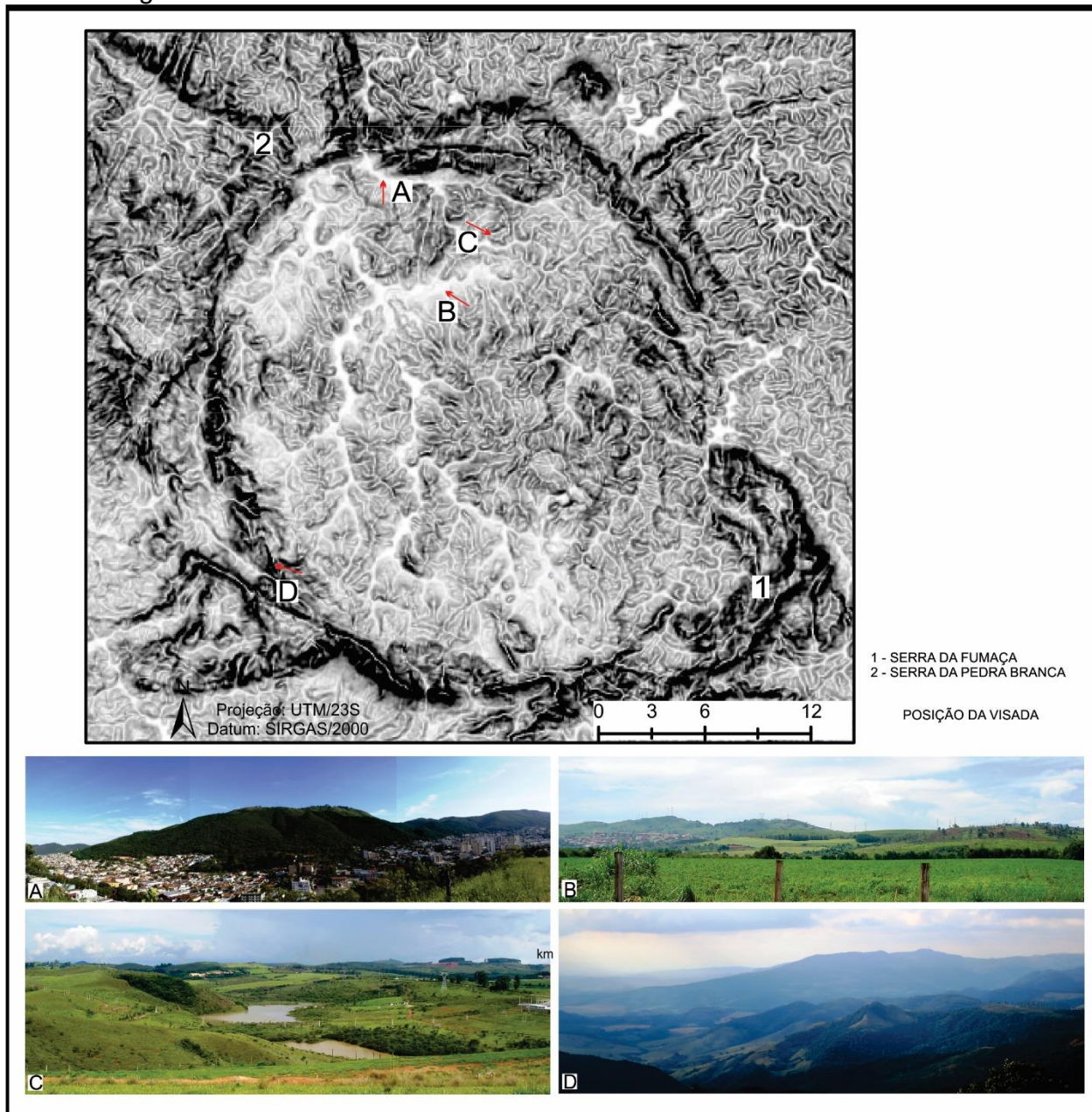
Nota-se nas Figuras 22A e 22D que o relevo montanhoso foi bastante evidenciado, destacando as serras constituintes do dique anelar que circunda o planalto de Poços de Caldas e as serras da Fumaça (noroeste da área) e da Pedra Branca (sudeste da área). Essa técnica também ressaltou o relevo colinoso (Fig. 22C) e a extensa planície fluvial do ribeirão das Antas (Fig. 22B) no interior do planalto. É possível observar, com mais detalhe que nas outras técnicas, a extensão desse padrão colinoso e suas feições. Além disso, as quebras de declive e algumas cristas alinhadas aparecem bem marcadas.

Na Figura 23 apresenta-se o produto resultante da técnica 3, de realce por filtro adaptativo, a qual possibilita a identificação de topos (preto), encostas (tons de cinza) e terrenos planos (branco). Essa técnica favorece a visualização de rupturas de declive e de algumas características relativas à drenagem.

Observa-se na Figura 23A que os fundos de vale foram bastante evidenciados por essa técnica. É possível identificar alguns vales abertos com fundo plano nos cursos d'água maiores como o ribeirão das Antas (Fig. 23B), e fundos de vale mais encaixados nos canais de menor ordem que cortam setores de vertentes íngremes. Também verificam-se padrões de drenagem diferenciados, como um padrão treliça nas áreas elevadas do embasamento cristalino a noroeste do planalto (Fig. 23C) e um padrão dendrítico e sub-dendrítico associado a bacia do rio Pardo a nordeste da área (Fig. 23D). No interior do planalto predomina um padrão dendrítico, mas em algumas áreas a drenagem é condicionada por um forte controle estrutural, com drenagens retilíneas (Fig. 23D) e feições de padrão semi-radial centrífugo (Fig. 23E).

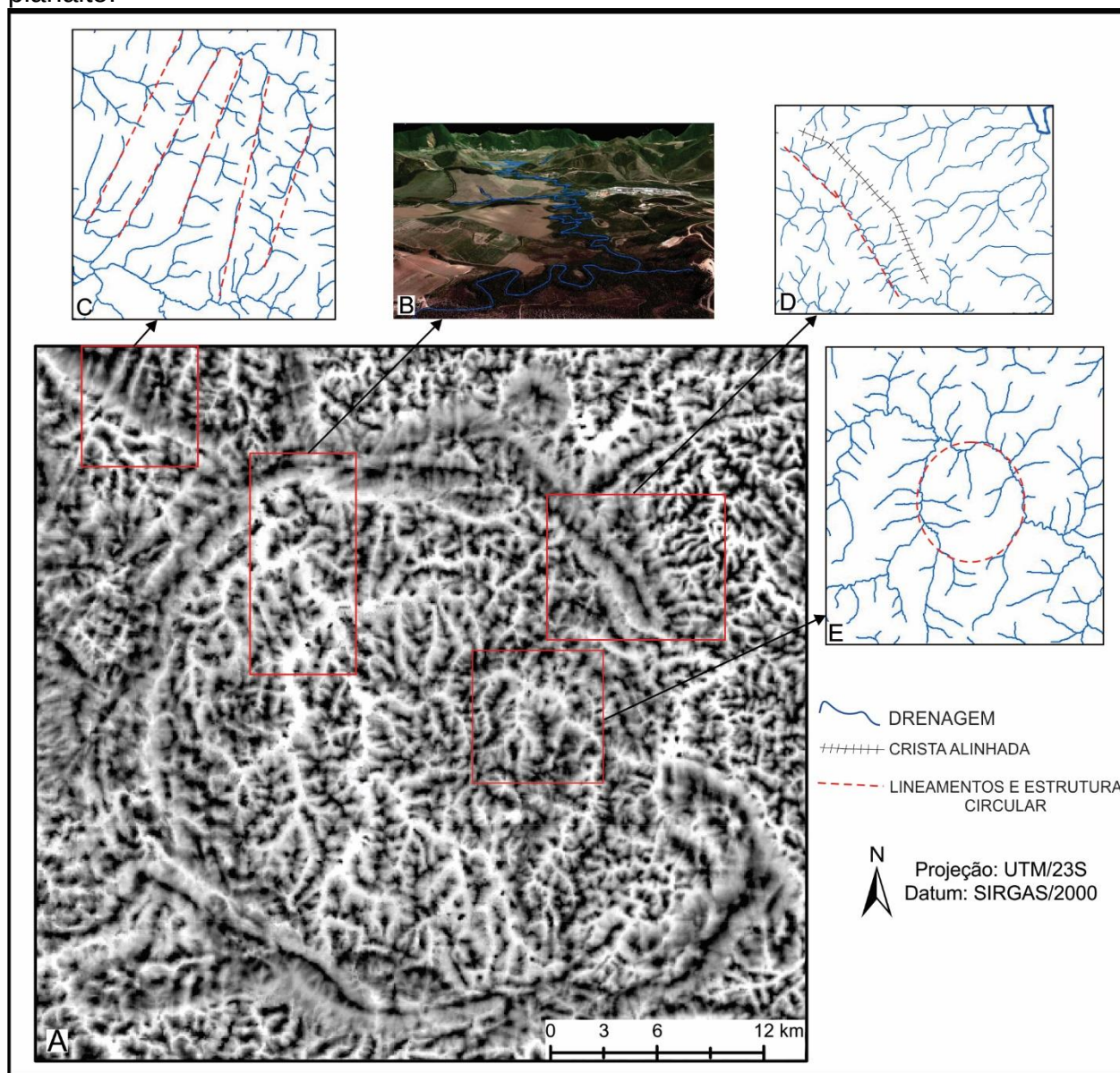
Assim como a técnica 1, de curvatura em perfil, a técnica de realce por filtro adaptativo pode destacar ruídos presentes nos dados SRTM dependendo do tamanho da janela móvel utilizada.

Figura 22. Produto resultante da técnica 2 (Declividade); A. Serra de São Domingos; B. Planície fluvial do ribeirão das Antas em contato com relevo colinoso nas proximidades do aeroporto; C. Visão a sudeste da Represa Saturnino de Brito; D. Trecho do dique anelar fotografado da Serra do Gavião.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 23. A. Produto resultante da técnica 3 (Realce por filtro adaptativo); B. Imagem de um trecho do vale aberto do ribeirão das Antas; C. Padrão de drenagem treliça associado a fraturas nas Serras do Boqueirão e da Fumaça; D. Padrão de drenagem dendrítico e sub-dendrítico associado a bacia do rio Pardo e drenagem encaixada em fratura no sopé do Serrote do Maranhão; E. Padrão de drenagem semi-radial centrífugo no interior do planalto.

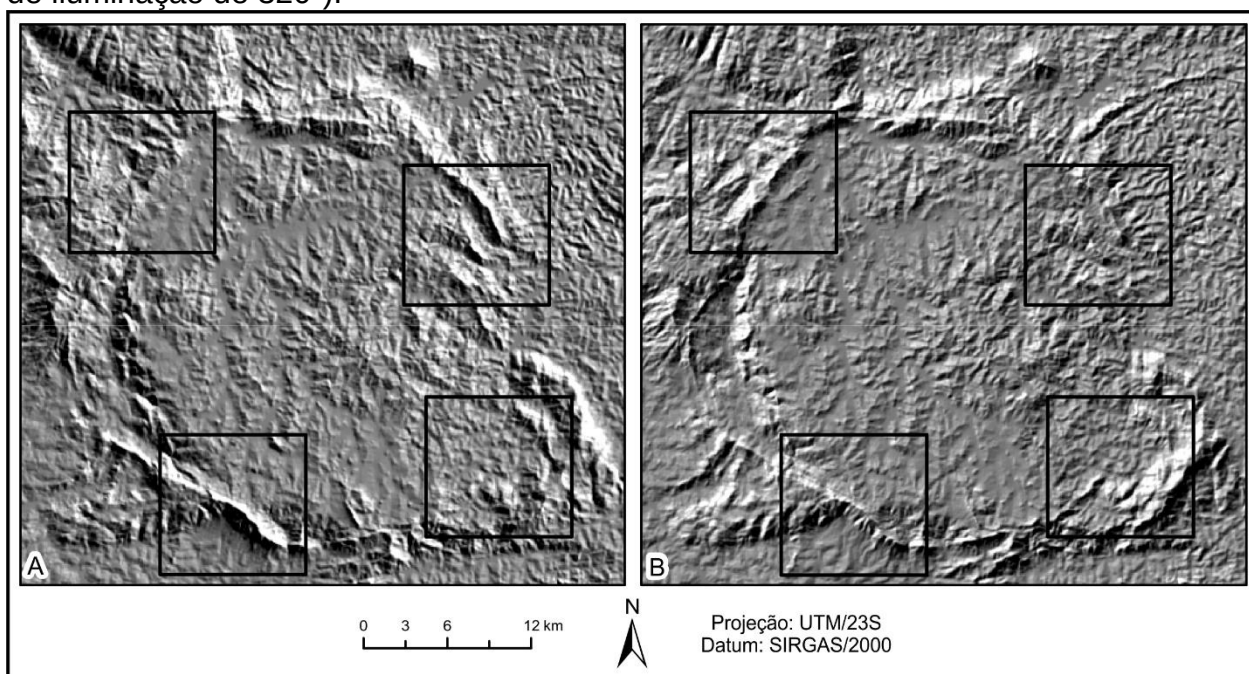


Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras 24A e 24B são o resultado da aplicação da técnica 4, de relevo sombreado com azimutes paralelo e ortogonal a principal direção dos lineamentos. Essa se mostrou uma técnica muito agradável para a visualização de alinhamentos e da densidade textural dos elementos do relevo, no entanto, ela é influenciada pelo viés da

iluminação. É possível notar nas áreas destacadas, determinadas feições (principalmente partes do dique anelar que circunda o planalto de Poços de Caldas) e alinhamentos que foram suprimidos ou ressaltados de acordo com o azimute de iluminação. Esse fator pode influenciar na identificação de padrões estruturais, linhas de ruptura do declive e numa análise da densidade dos elementos do relevo, gerando confusão para delimitar áreas com padrões de relevo semelhantes.

Figura 24. Produto resultante da técnica 4 (Relevo sombreado com azimute de iluminação de 50°); B - Produto resultante da técnica 4 (Relevo sombreado com azimute de iluminação de 320°).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados obtidos a partir das visualizações combinadas 1 e 2 são mostrados nas Figuras 25A e 25B. Nessas duas figuras observa-se que ocorreu uma adição de aspectos texturais à elevação altimétrica, o que possibilitou a visualização de um maior nível de detalhe de alguns elementos de análise do relevo.

Bastante utilizada, a visualização combinada 1, do modelo digital de elevação em escala de cores + relevo sombreado (Fig. 25A), tem como diferencial uma percepção da amplitude local associada a um produto que possibilita uma visualização da densidade textural do relevo, mas não favorece a visualização da drenagem. Já a visualização

combinada 2 (Fig. 25B), do modelo digital de elevação em escala de cores + declividade, proporciona uma boa visualização de elementos de análise como amplitude, densidade textural do relevo e linhas de rupturas de declive sem a utilização de um produto influenciado pela iluminação. Além disso, a declividade permite uma visualização mais detalhada do relevo suavizado e todas as suas feições no interior do planalto. Comparativamente, a Figura 25B apresenta uma fidelidade maior às feições reais do terreno que a Figura 25A por ser livre do viés de iluminação.

Os resultados obtidos a partir das visualizações combinadas 3 e 4 são mostrados nas Figuras 26 e 27. Nota-se que houve um ganho ainda maior na visualização de detalhes do terreno comparado as duas combinações anteriores. A utilização de um par de imagens com azimutes paralelo e ortogonal em uma composição colorida minimiza o efeito do viés de iluminação e promove uma representação mais fidedigna do relevo.

A visualização combinada 3, ilustrada pela composição colorida entre os azimutes 50° e 320° na Figura 26A, evidenciou mais que as outras técnicas e combinações testadas os alinhamentos de relevo e lineamentos estruturais da área. A Figura 26B apresenta o mapeamento dos principais lineamentos, alinhamentos de relevo e estruturas circulares extraídos da visualização combinada 3. Observa-se que além da direção preferencial 140°(NW-SE), foi identificada também uma grande quantidade de lineamentos na direção 30°(NE-SW), principalmente a noroeste da área estudada. De acordo com Moreira et al. (2007), esse par conjugado de direções pode estar associado a falhas transcorrentes. Já citadas por Almeida Filho e Paradella (1977), algumas estruturas circulares, provavelmente associadas a cones vulcânicos, também são visualizadas no interior do planalto a partir dessa visualização.

Figura 25. A – Visualização combinada 1 (modelo digital de elevação (em uma escala de cores) + relevo sombreado com azimuth de 50°); B - Visualização combinada 2 (modelo digital de elevação (com uma escala de cores) + declividade (com a escala de cores do branco para o preto)).

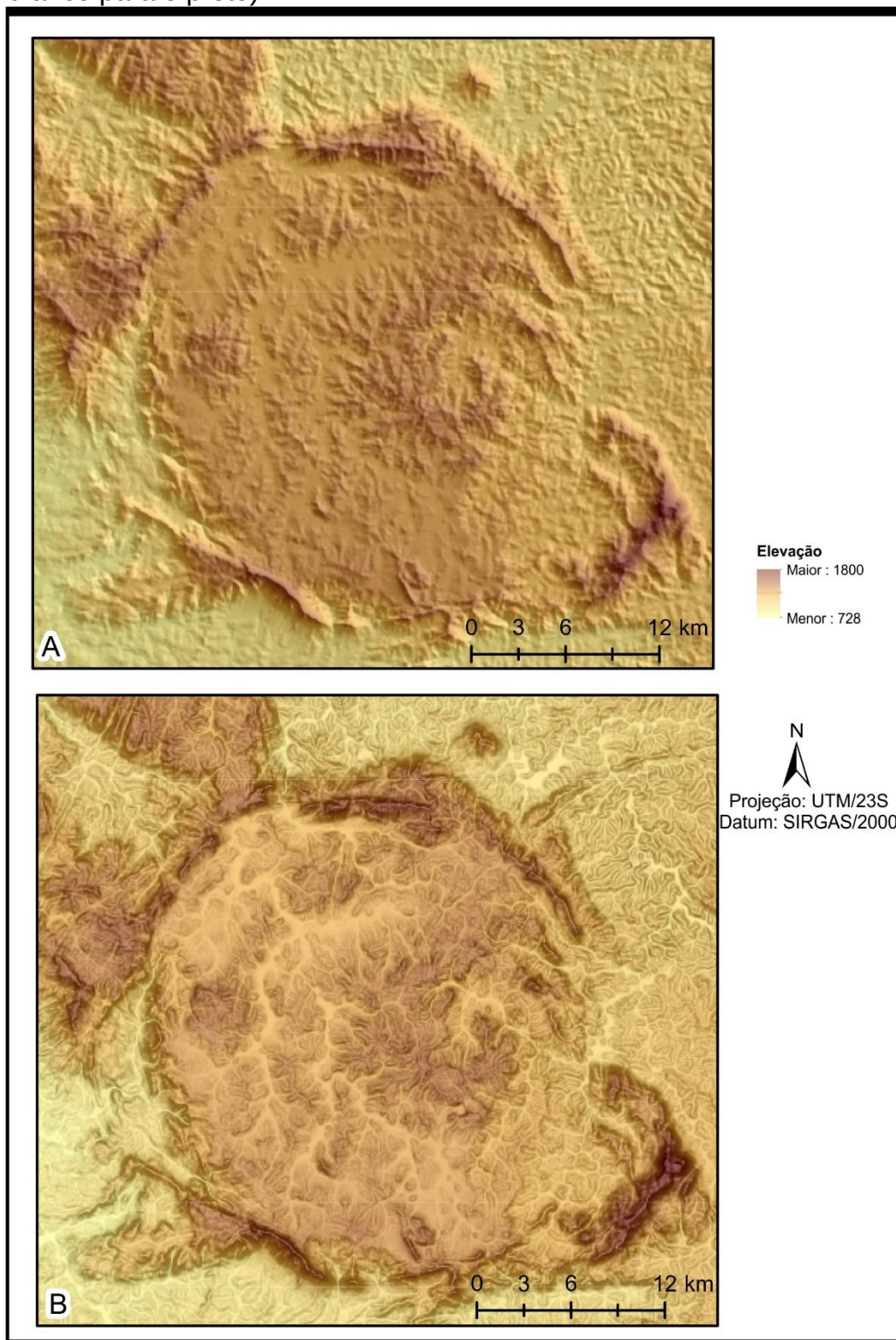
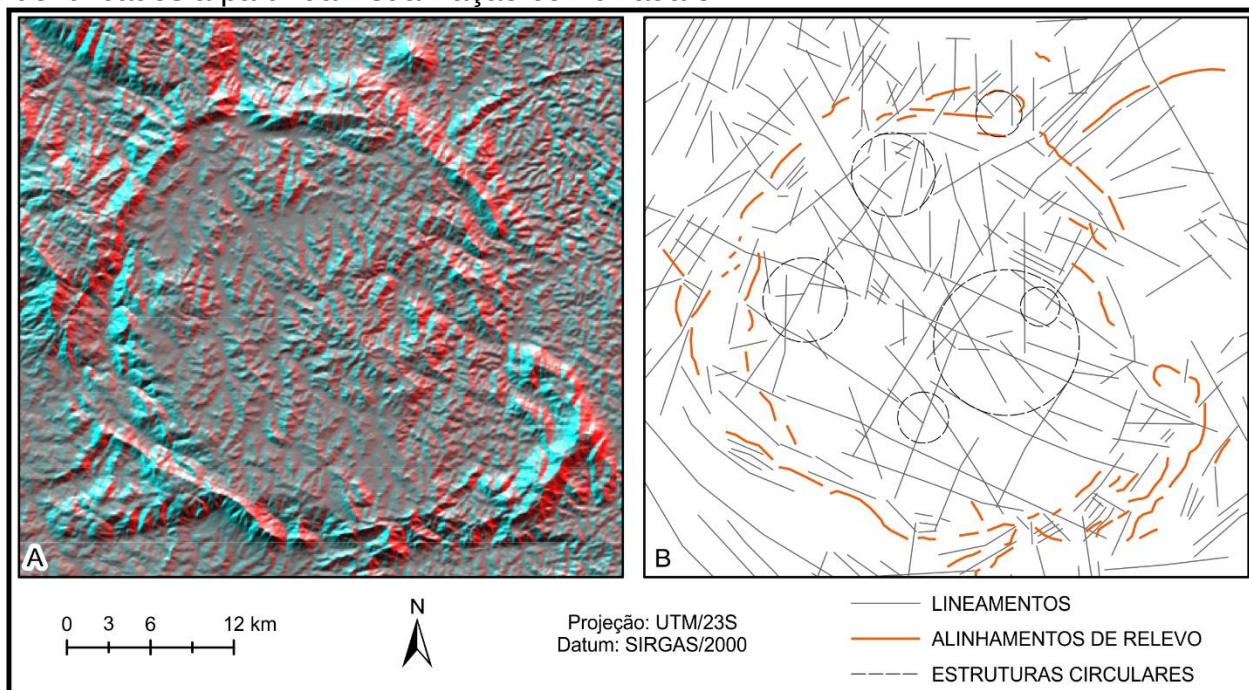


Figura 26. A - Visualização combinada 3 (Composição colorida entre os azimutes 50° e 320°); B- Principais lineamentos, alinhamentos de relevo e estruturas circulares identificados a partir da visualização combinada 3.



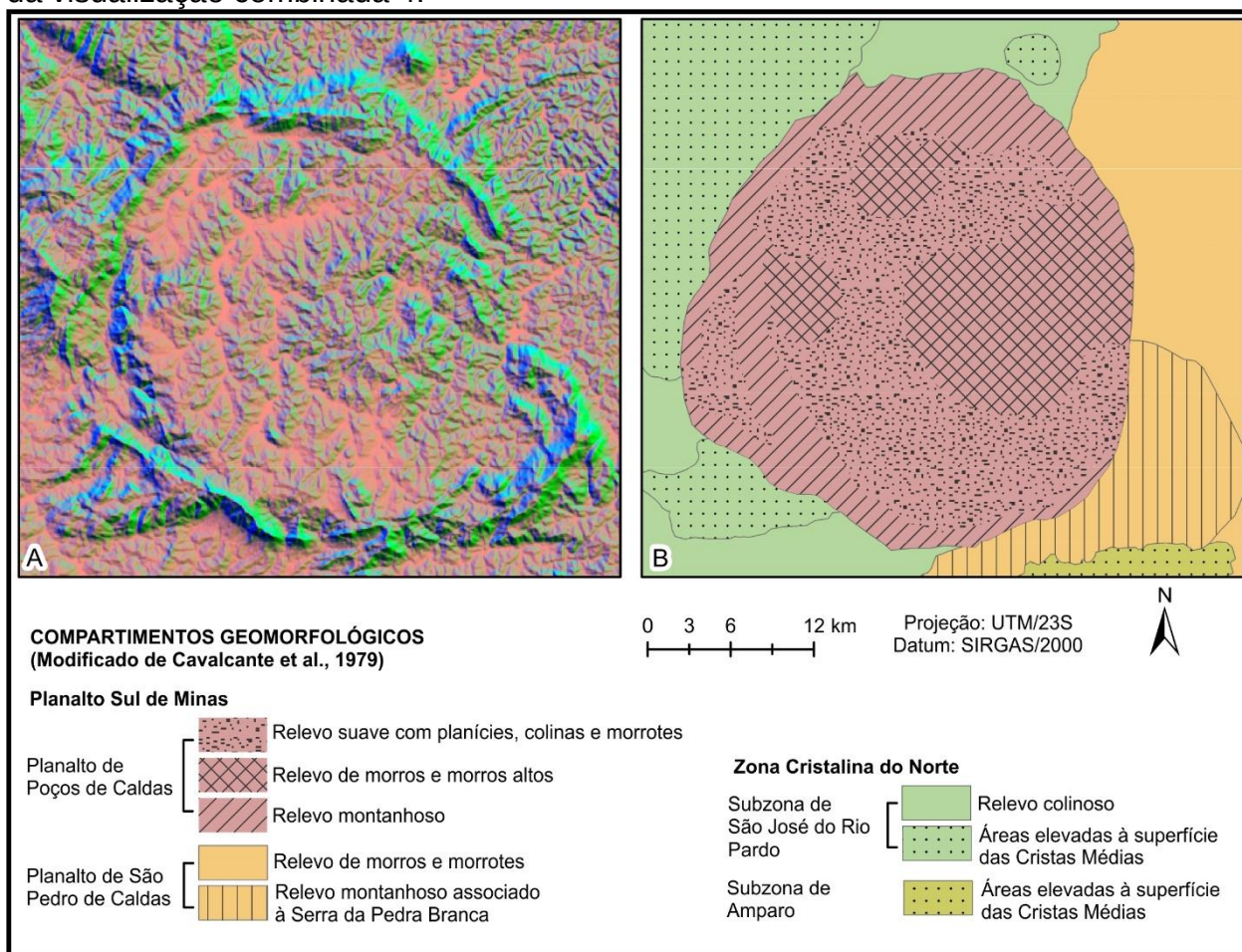
Fonte: Elaborado pelo autor.

A visualização combinada 4, ilustrada pela composição colorida entre os azimutes 50° e 320° e a declividade, foi a que apresentou melhores resultados para uma visualização mais detalhada das feições do relevo. Conforme pode ser observado na Figura 27A, os alinhamentos aparecem bem marcados e rupturas de declive e fundos de vale também são destacados. Essa composição ainda possibilita uma boa visualização das direções das vertentes, podendo ser aplicada na identificação preliminar de padrões de relevo e áreas relevantes para o estudo de processos erosivos.

A partir dessa visualização, um mapa de compartimentos geomorfológicos simplificado foi gerado baseado na proposta de Cavalcanti et al. (1979). Os compartimentos propostos pelos autores foram mantidos (planalto de Poços de Caldas, planalto de São Pedro de Caldas, subzona de São José do Rio Pardo e subzona de Amparo), mas seus limites generalizados foram reinterpretados de acordo com a visualização combinada 4 e assim redefinidos com maior detalhe para a escala trabalhada. Além disso, essa composição permitiu o detalhamento de alguns

compartimentos, principalmente do planalto de Poços de Caldas, conforme mostra a Figura 27B.

Figura 27. A - Visualização combinada 4 (Composição colorida entre os azimutes 50° e 320° e a declividade); B – Mapa de compartimentos geomorfológicos delimitados a partir da visualização combinada 4.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da avaliação dos produtos gerados através das quatro técnicas de visualização de modelos digitais de elevação e das quatro visualizações combinadas, elaborou-se uma tabela com indicações dos melhores produtos para o estudo de cada elemento de análise do relevo. O Quadro 9 mostra os resultados obtidos.

Quadro 9. Melhores produtos para o estudo de cada elemento de análise do relevo.

Elemento de análise de relevo	Melhores produtos
Densidade dos elementos de drenagem	Técnica 3 - Realce por filtro adaptativo
Densidade dos elementos do relevo	Visualização combinada 3 Visualização combinada 4
Amplitude local	Visualização combinada 2
Declividade	Técnica 2 – Declividade
Linhas de rupturas de declive	Técnica 3 - Realce por filtro adaptativo Visualização combinada 4
Lineamentos e alinhamentos de relevo	Visualização combinada 3
Padrões de drenagem	Técnica 3 - Realce por filtro adaptativo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Dentre as técnicas e visualizações combinadas testadas, a técnica 3, de realce por filtro adaptativo, se destacou na análise dos padrões de drenagem e de densidade dos elementos de drenagem por ressaltar os fundos de vale, e consequentemente permitir uma diferenciação de áreas com mais ou menos canais e sob diferentes controles estruturais. Já visualização combinada 2 (modelo digital de elevação (em uma escala de cores) + declividade) prevaleceu na análise da amplitude local, pois diminui a generalização gerada apenas pela elevação em cores e possibilita a visualização da amplitude em maior detalhe.

A visualização combinada 3 (Composição colorida entre os azimutes 50° e 320°) apresentou o melhor desempenho no reconhecimento de alinhamentos de relevo que podem indicar lineamentos estruturais e se mostrou um bom instrumento para a análise estrutural da área. Por fim, a visualização combinada 4 (Composição colorida entre os azimutes 50° e 320° e a declividade) se destacou na identificação das quebras de declive, pois refinou as características do relevo sombreado com o acréscimo da declividade, destacou os fundos de vale e ainda proporcionou a melhor visualização da densidade textural dos elementos do relevo.

6.2 Experimento 2

Após os resultados obtidos no Experimento 1, observaram-se as pontencialidades dos MDEs e optou-se por empregá-los também na classificação automatizada do relevo.

6.2.1 Seleção da janela móvel

Dezenove classes propostas na legenda de Dikau, Brabb e Mark (1991) foram identificadas na classificação do relevo efetuada nos vários tamanhos de janela móvel testados. Como já explicitado, para a validação dos resultados, essas classes foram reunidas em grupos representativos das classes, conforme mostra o Quadro 10. As classes de tabuleiro foram consideradas uma exceção, visto que a área das três classes somadas não ultrapassou 1% da área total mapeada em nenhuma das janelas testadas. Assim, optou-se por agrupá-las ao conjunto com características de maior similitude, ou seja, aos terrenos planos.

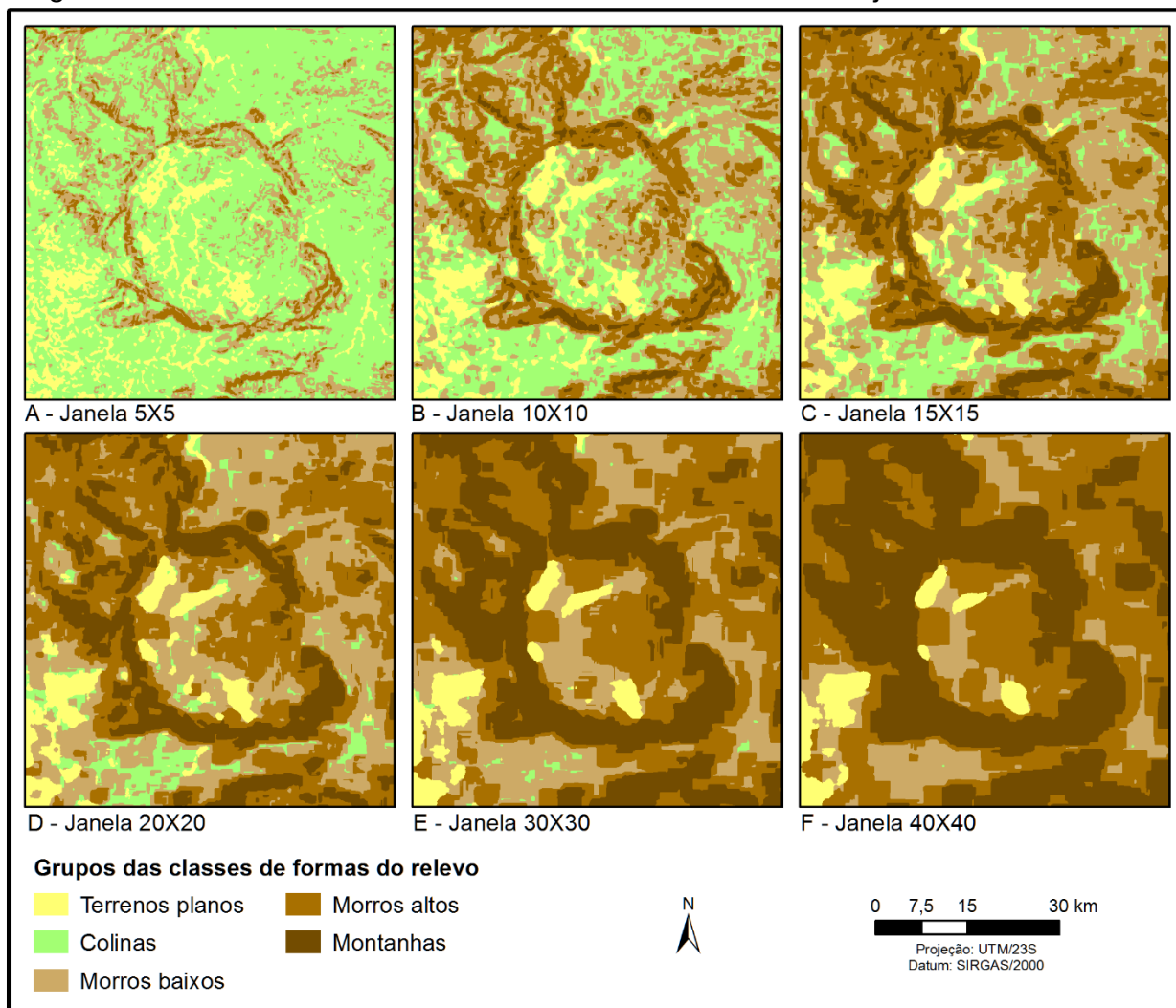
Quadro 10. Classes geradas e seus respectivos grupos representativos das formas de relevo.

Classes	Grupos
Terrenos planos ou quase planos Terrenos planos suavizados com algum relevo local Terrenos planos irregulares com relevo baixo Terrenos planos irregulares com relevo moderado Terrenos planos com colinas Terrenos planos com morros Terrenos planos com montanhas baixas Tabuleiro com relevo moderado Tabuleiro com relevo considerável Tabuleiro com relevo alto	→ Terrenos planos
Colinas baixas suavizadas Colinas altas suavizadas Colinas altas	→ Colinas
Morros baixos suavizados Morros baixos	→ Morros Baixos
Morros altos suavizados Morros altos	→ Morros Altos
Montanhas baixas suavizadas Montanhas baixas	→ Montanhas

Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 28 apresenta o resultado da classificação do relevo para todos os tamanhos de janela móvel testados e a Tabela 5 mostra o acerto geral, o coeficiente de concordância Kappa e as categorias de concordância Kappa, segundo Landis e Koch (1977).

Figura 28. Resultados obtidos com os diferentes tamanhos de janela móvel testados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 5. Acerto geral, coeficiente de concordância Kappa e categorias de concordância Kappa, segundo Landis e Koch (1977) para todos os tamanhos de janela móvel testados.

Janelas móveis testadas	Acerto geral	Coeficiente de concordância Kappa	Categorias de concordância Kappa (Landis e Koch, 1977)
Janela 5X5	35.67%	0,19	Fraca
Janela 10X10	69.0%	0,61	Forte
Janela 15X15	62.0%	0,52	Moderada
Janela 20X20	55.33%	0,44	Moderada
Janela 30X30	47.33%	0,34	Razoável
Janela 40x40	39.67%	0,24	Razoável

Fonte: Elaborado pelo autor.

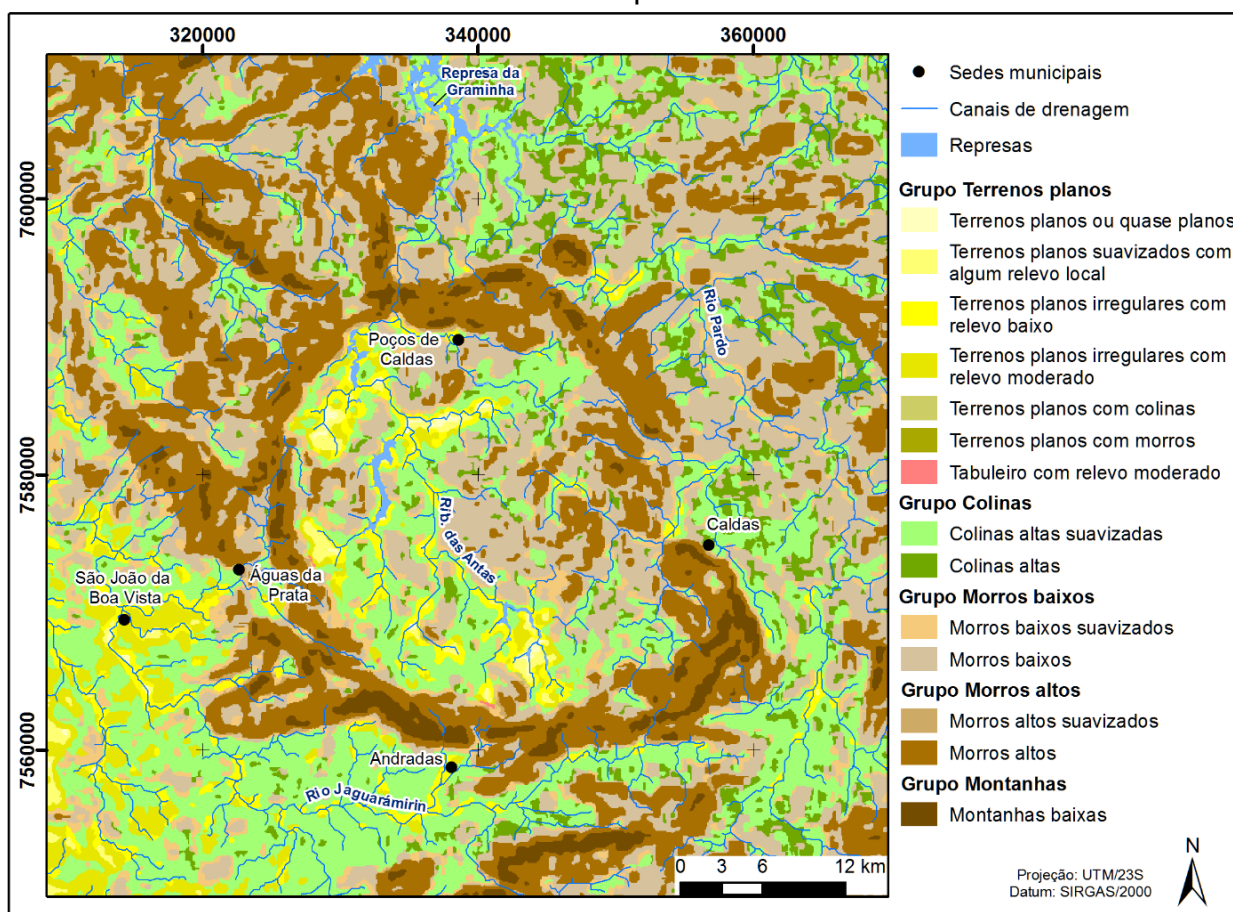
Observando a Figura 28, percebe-se que o tamanho da janela móvel foi determinante no mapeamento integral ou parcial das formas de relevo. Através desse teste observou-se que quando se aumentava a janela (Ex: 30X30, 40X40) havia uma generalização das Montanhas e Morros altos, os quais eram claramente superestimados, enquanto os Terrenos planos e Colinas eram, em sua maioria, suprimidos. O inverso ocorreu no teste da janela móvel de 5X5 pixels. Terrenos planos e Colinas foram superestimados, enquanto os Morros baixos e Morros altos foram parcialmente identificados e as Montanhas foram totalmente suprimidas.

A partir da Tabela 5, nota-se que a janela móvel de 10X10 pixels apresentou o maior valor de acerto geral - 69%, e do coeficiente de concordância Kappa – 0,61%. Estes índices, de acordo com a categorização proposta por Landis e Koch (1977), indicam uma forte concordância com os dados de referência, o que representa uma substancial precisão na classificação dos grupos representativos das classes de formas de relevo. Mediante os resultados dessa análise estatística, a janela móvel de 10X10 pixels foi selecionada para a elaboração do mapa final.

6.2.2 Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo

Quatorze classes foram identificadas na área com a janela de 10X10 pixels, sendo que 3 delas (Morros baixos, Morros altos e Colinas altas suavizadas) correspondem a mais de 75% da área total, como pode ser observado na Figura 29. A Tabela 6 apresenta as classes de padrões de formas semelhantes do relevo, geradas com suas respectivas áreas e porcentagens de ocorrência.

Figura 29. Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo, resultante da janela de 10X10 pixels.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6. Classes de padrões de formas semelhantes do relevo geradas e respectivas áreas de ocorrência.

Classes	Área (km²)	Área (%)
Terrenos planos com morros	0.10	< 0.01
Tabuleiros com relevo moderado	0.46	0.01
Terrenos planos com colinas	2.75	0.07
Terrenos planos ou quase planos	5.49	0.15
Morros altos suavizados	15.89	0.42
Terrenos planos suavizados com algum relevo local	29.39	0.79
Montanhas baixas	97.77	2.61
Terrenos planos irregulares com relevo moderado	119.89	3.20
Terrenos planos irregulares com relevo baixo	130.58	3.49
Colinas altas	223.91	5.98
Morros baixos suavizados	273.77	7.31
Colinas altas suavizadas	825.69	22.06
Morros altos	944.02	25.22
Morros baixos	1073.85	28.69

Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma reclassificação foi realizada para classes geradas com áreas de ocorrência menores que 1% da área total mapeada, ou seja, com pouca representatividade espacial. Assim, essas classes foram reclassificadas para classes com características semelhantes, conforme mostra o Quadro 11.

Quadro 11. Reclassificação das classes com áreas menores que 1% da área total mapeada.

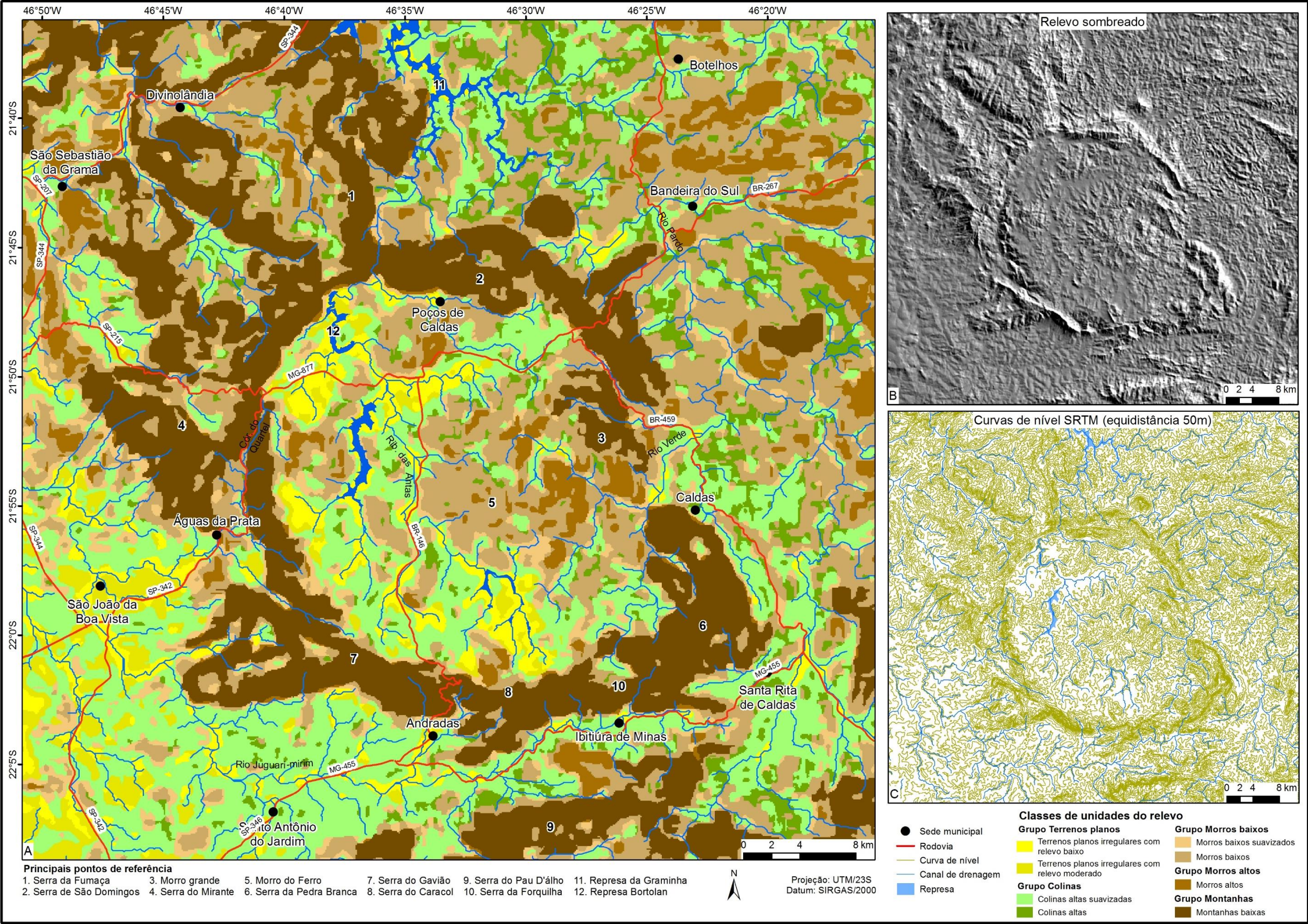
Classe original		Após reclassificação
Terrenos planos com morros	→	Terrenos planos irregulares com relevo moderado
Tabuleiros com relevo moderado	→	Terrenos planos irregulares com relevo moderado
Terrenos planos com colinas	→	Terrenos planos irregulares com relevo moderado
Terrenos planos ou quase planos	→	Terrenos planos irregulares com relevo baixo
Morros altos suavizados	→	Morros altos
Terrenos planos suavizados com algum relevo local	→	Terrenos planos irregulares com relevo baixo

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observou-se também que o tamanho da janela móvel de 10X10 pixels, apesar de um bom desempenho estatístico para os grupos de classes, compartimentou algumas formas de relevo de maior dimensão, como pode ser observado na Figura 29. Na área de estudo, esse problema ocorreu principalmente com o relevo montanhoso do dique anelar que circunda o Planalto de Poços de Caldas. A janela selecionada não englobou a montanha em sua totalidade e acabou por dividi-la em três classes, sendo Morros baixos suavizados na baixa vertente, Morros Altos em grande parte da vertente e Montanhas Baixas, em apenas pequenos polígonos no topo. Com o objetivo de minimizar esse problema, foi realizada uma análise espacial para a reclassificação dos polígonos referentes ao relevo montanhoso. As áreas classificadas como Morros altos, que contivessem polígonos de Montanhas Baixas, foram reclassificadas como Montanhas baixas. A Figura 30 apresenta o mapa final de padrões de formas semelhantes do relevo, resultante da janela de 10X10 pixels, após as reclassificações.

Esse mapa foi igualmente validado a partir dos dados de referência, obtidos em campo e no escritório. Houve uma melhora significativa do acerto geral, que passou a ser de 82,33% e do coeficiente de concordância Kappa, que subiu para 0,77. De acordo com a categorização proposta por Landis e Koch (1977), o valor de coeficiente de concordância Kappa atingido continua indicando uma forte concordância na classificação dos grupos representativos das classes de formas de relevo. A Tabela 7 mostra a matriz de erro, o acerto geral e o coeficiente de concordância Kappa para o mapa de padrões de formas semelhantes do relevo após a etapa de reclassificação e a Tabela 8 apresenta a acurácia do usuário e a acurácia de produção para cada um dos grupos de classe de formas semelhantes do relevo.

Figura 30. Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo, após a etapa de reclassificação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7. Matriz de erro e o coeficiente de concordância Kappa para o mapa de padrões de formas semelhantes do relevo, após a etapa de reclassificação.

Dado Classificado	Dado de Referência					Total
	Terrenos planos	Colinas	Morros baixos	Morros altos	Montanhas	
Terrenos planos	42	9	0	0	0	51
Colinas	3	48	12	1	0	64
Morros baixos	0	8	57	9	2	76
Morros altos	0	0	1	32	0	33
Montanhas	0	0	3	5	68	76
Total	45	65	73	47	70	300
						Acerto geral= 82,33%
						Kappa= 0,77

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8. Acurácia do usuário e a acurácia de produção para o mapa de padrões de formas semelhantes do relevo, após a etapa de reclassificação.

Grupos de classe	Acurácia do usuário	Acurácia de produção
Terrenos planos	89,47%	97,14%
Colinas	75,00%	73,85%
Morros baixos	75,00%	78,08%
Morros altos	96,97%	68,09%
Montanhas	82,35%	93,33%

Fonte: Elaborado pelo autor.

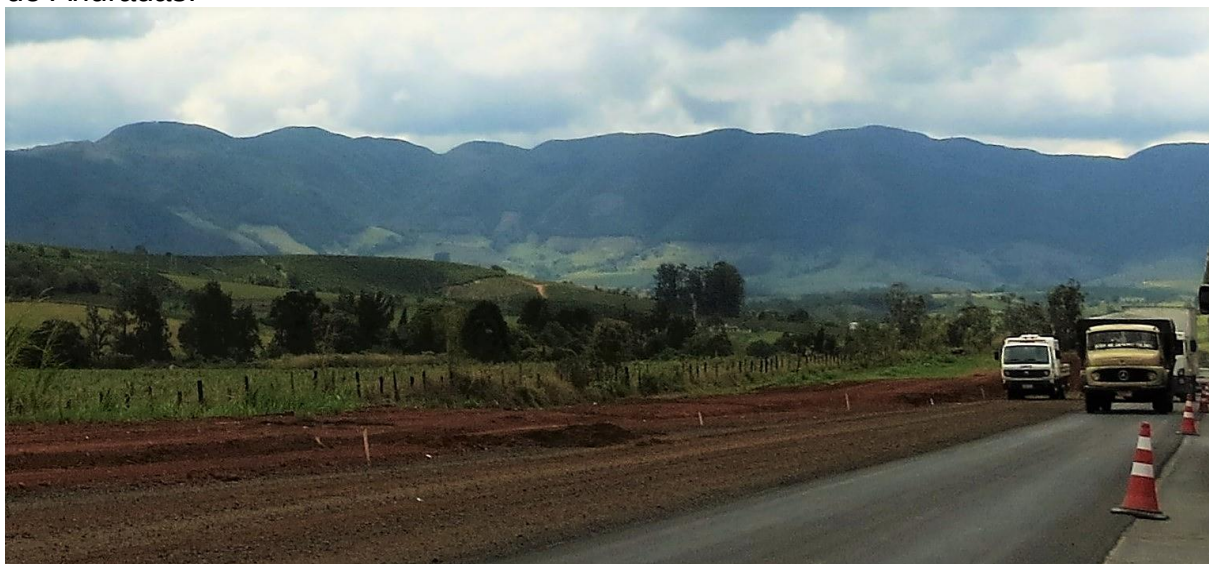
A partir das Tabelas 7 e 8 é possível observar que o grupo de Terrenos planos destaca-se com o melhor desempenho na classificação, pois apresentou o valor mais alto de acurácia de produção (97,14%) e o segundo maior valor de acurácia do usuário (89,47%). Esses valores sugerem que a janela de 10X10 pixels foi ideal para a delimitação desse grupo. O grupo de Montanhas também apresentou um bom desempenho na classificação, tendo o segundo maior valor de acurácia de produção (93,33%) e um valor intermediário de acurácia do usuário (82,35%). No entanto, esses valores só foram alcançados após a etapa de reclassificação.

Os grupos de Colinas e Morros baixos concentraram os menores valores de acurácia do usuário (75%), o que significa que há maior probabilidade de serem confundidos com outros grupos. Esse pode ser um indicativo de que essas classes podem ter sido superestimadas na classificação automática. Já os Morros altos apresentaram o pior valor de acurácia de produção, mas o maior valor para acurácia do usuário, o que significa que há 68,09% de chance desse grupo ser classificado corretamente e 96,97% de probabilidade de não ser confundido com outras classes.

No processo de reclassificação, esse grupo perdeu grande quantidade de área para o grupo Montanhas e, conseqüentemente, pode ter tido sua área subestimada no mapa final.

Além da validação estatística, foi realizada uma análise comparativa com outros estudos e mapeamentos produzidos na área. O relevo montanhoso (Fig. 31), correspondente ao dique anelar que circunda o planalto de Poços de Caldas, e seu interior, com topografia menos movimentada, declividades mais suaves e predomínio dos grupos Colinas e Morros baixos (Fig. 32), foram mapeados e/ou descritos por Christofolletti (1973), Brasil (1979), IPT (1981), Leonardi (2007), Moraes e Jiménez-Rueda (2008), Tinós (2011) e Zaine (2011).

Figura 31. Relevo montanhoso do dique anelar visto a partir da MG – 455 a caminho de Andradadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 32. Colinas e morros baixos no interior da caldeira.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Zaine (2011) elaborou um mapeamento geológico-geotécnico do município de Poços de Caldas e estabeleceu unidades de relevo a partir da relação entre as formas e o substrato geológico. O autor denominou o relevo constituído por montanhas alinhadas dos diques anelares de Zona da Serra Anelar e identificou que as principais litologias associadas a esse compartimento são os tinguaitos, rochas alcalinas grossas (chibinitos e lujaunitos) e foiaítos. No interior da caldeira, o autor relatou a predominância de tinguaitos em relevo de morros, foiaítos em relevo de morros e morrotes, fonólitos e tufo vulcânicos em relevo de colinas, além de planícies aluviais, observadas na Figura 33. Observou-se uma grande semelhança entre as unidades geradas pela classificação automatizada e as unidades compartimentadas por Zaine (2011) a partir do método visual nas áreas citadas.

A área de relevo mais movimentado na porção leste do interior planaltino, onde foram identificadas as classes de Morros baixos, Morros altos e Montanhas baixas, foi mapeada por Leonardi (2007) e relatada por Christofolletti (1972) como uma região com maiores diferenças altimétricas (entre o topo e a base) e declividades mais acentuadas, onde estão localizados o Morro Grande (Fig. 34) e o Morro do Ferro.

Figura 33. Aeroporto de Poços de Caldas localizado na planície aluvial do ribeirão das Antas.



Fonte: Aeroporto de Poços de Caldas.

Figura 34. Relevo de morros altos e morros baixos na área do Morro Grande, no interior do planalto de Poços de Caldas.



Fonte: GODOY, E.

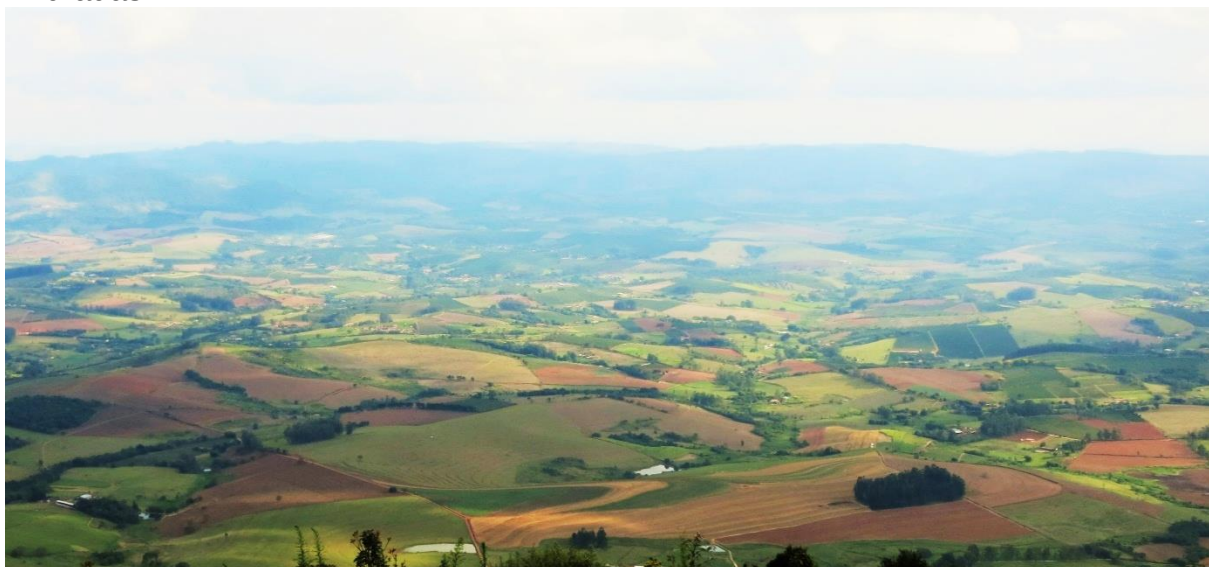
A noroeste e ao sul da área, observou-se que as áreas elevadas pertencentes à Zona Cristalina do Norte (BRASIL, 1979), onde se localizam as Serra da Fumaça, Serra do Mirante e Serra do Pau D'alho, foram identificadas satisfatoriamente como Montanhas Baixas, circunvizinhas a Morros baixos e Morros altos. Essas classes correspondem à descrição de Brasil (1979) e IPT (1981), de um relevo movimentado de escarpas e mar de morros, sobretudo a noroeste de Poços de Caldas. A sudoeste a topografia aparece bem menos movimentada, com as classes Terrenos planos e Colinas altas suavizadas marcando a transição do Planalto Sul de Minas para a Depressão Periférica Paulista. Segundo Brasil (1979), IPT (1981) e Moraes e Jiménez-Rueda (2008) essa área é caracterizada pelo predomínio de colinas e morrotes com altitudes que se nivelam àquelas da Depressão Periférica, pelas declividades suaves, dissecação de baixa a moderada e amplitude local com pouca variação. Essas duas áreas podem ser observadas na Figuras 35 e 36.

Figura 35. Pedra do Elefante, localizada na Serra do Pau D'alho em meio ao relevo de montanhas e morros baixos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36. Relevo colinoso com declividades suaves observado na região de Andradadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O nordeste e leste da área de estudo abrangem a região classificada por Brasil (1979) de Planalto Sul de Minas. Segundo os autores, ocorre uma ampla superfície de relevo ondulado a leste da Represa da Graminha (extremo norte da área), classificada no mapa como Colinas altas suavizadas, Colinas altas e Morros baixos. Nas imediações do Rio Pardo, essa área evolui para um relevo mais movimentado, com diferenças altimétricas maiores e declividades mais acentuadas, onde ocorrem predominantemente as classes de Morros baixos e Morros altos. Esses morros se estendem por toda a borda leste do planalto de Poços de Caldas, onde novamente o relevo se suaviza e a classe de Colinas altas suavizadas volta a predominar. Zaine (2011) descreveu e mapeou nessa área um relevo de morros e morrotes em forma de “meia laranja” sustentados por gnaisses e migmatitos, com predomínio de encostas suavizadas, o que se assemelha às classes identificadas no mapa. Essa área pode ser observada nas Figuras 37, 38 e 39.

Figura 37. Represa da Graminha e relevo de colinas no norte da área.



Fonte: BERNARDES, L.

Figura 38. Morros baixos em forma de “meia laranja” localizados na região nordeste da área.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39. Relevo ondulado com colinas e morros nas proximidades da cidade de Caldas.



Fonte: GODOY, E.

Após essa análise comparativa com outros estudos e mapeamentos produzidos na área, observou-se que o mapa final de padrões de formas semelhantes do relevo, produzido nesse trabalho, mostrou-se concordante com muitas das descrições já realizadas. De modo geral, as classes identificadas corresponderam ao tipo de forma do relevo e respectivas áreas de ocorrência relatadas por outros pesquisadores.

A metodologia de classificação das formas de relevo, proposta por Hammond (1954, 1964) e aprimorada por Dikau, Brabb e Mark (1991), mostrou-se bastante viável para aplicação na região do planalto de Poços de Caldas, no entanto, alguns fatores precisam ser considerados.

O mapa de forma semelhantes do relevo ilustrado na Figura 30 é apresentado em escala 1:250.000, mas como foi gerado a partir de dados SRTM de 90 metros de resolução, esse mapa é compatível a escala planimétrica de até 1:100.000 (GROHMANN; RICCOMINI; STEINER, 2008).

Quanto aos parâmetros de classificação propostos por Hammond (1954, 1964) – declividade, amplitude (relevo local) e perfil do relevo – notou-se que o perfil do relevo tem pouca influência, sendo considerado apenas na diferenciação entre Tabuleiros e Terrenos planos. Assim, o parâmetro perfil do relevo praticamente não exerceu influência sobre o resultado obtido para a área do planalto de Poços de

Caldas, visto que as classes de tabuleiros não apresentaram áreas significativas na região.

Outro o ponto a ser considerado dessa metodologia está relacionado ao tamanho da janela móvel, pois ele determina quais formas do relevo serão integralmente ou parcialmente detectadas e quais formas serão suprimidas. Apesar da janela de 10X10 pixels ter apresentado um melhor resultado estatístico, observou-se que não existe um tamanho de janela ideal para todas as formas. Melhores resultados seriam alcançados se fosse possível utilizar uma janela móvel específica para cada grupo ou classe de formas do relevo.

6.3 Experimento 3

A partir das considerações efetuadas no Experimento 2, o Experimento 3 foi desenvolvido e tem seus resultados apresentados a seguir. Uma nova ferramenta foi desenvolvida a partir da ferramenta anterior, com objetivo de determinar qual seria a melhor janela para cada grupo de classes de formas do relevo e dessa forma, compor um mapa a partir de polígonos advindos das melhores janelas. Nesse experimento foram utilizados dados SRTM de 30 metros de resolução.

6.3.1 Classificação das formas de relevo por meio de janelas múltiplas

Inicialmente, treze classes propostas na legenda de Dikau, Brabb e Mark (1991) foram identificadas na área da bacia do rio Corumbataí a partir da classificação do relevo efetuada nos vários tamanhos de janela móvel testados. Para a avaliação e seleção do tamanho da melhor janela para cada forma do relevo, essas classes foram reunidas em grupos representativos das classes, conforme mostra o Quadro 12.

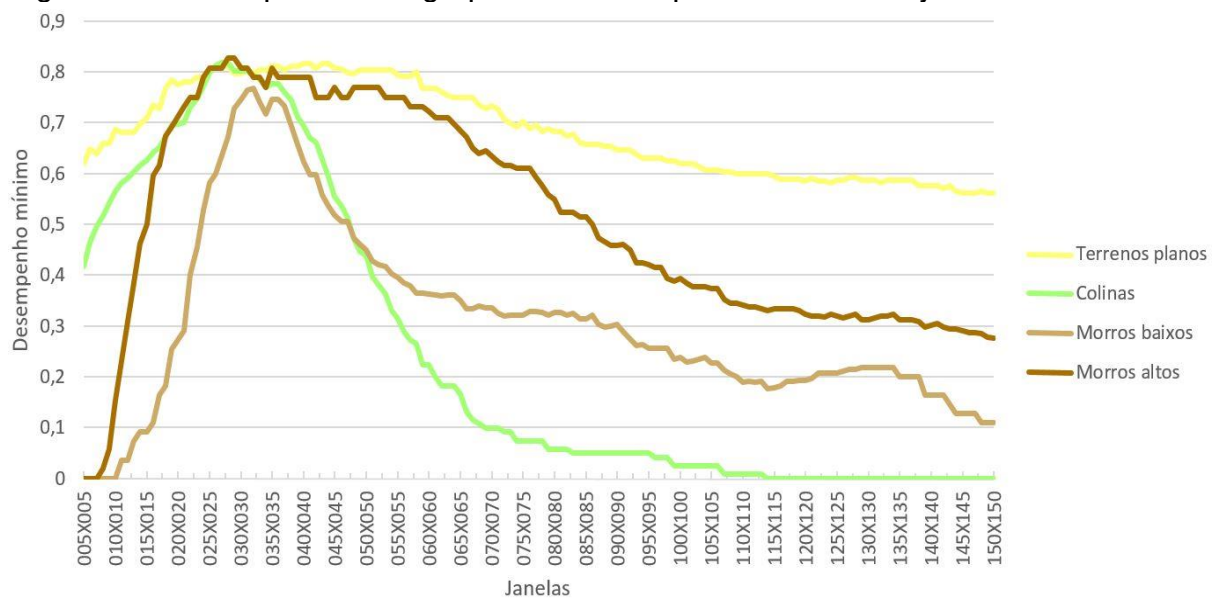
Foram testadas janelas com tamanho variando entre 5x5 e 150x150 pixels e o desempenho dos grupos de classe por tamanhos de janela móvel pode ser observado na Figura 40. É importante destacar que o desempenho aqui avaliado é relativo a acurácia mínima observada, como já explicado no tópico de Materiais e métodos. A partir da avaliação do desempenho, o melhor tamanho de janela móvel foi definido para cada grupo de classe, como mostra a Tabela 9.

Quadro 12. Classes geradas e seus respectivos grupos representativos das formas de relevo.

Classes	Grupos
Terrenos planos ou quase planos Terrenos planos suavizados com algum relevo local Terrenos planos irregulares com relevo baixo Terrenos planos irregulares com relevo moderado Terrenos planos com colinas Terrenos planos com morros Tabuleiro com relevo moderado	→ Terrenos planos
Colinas altas suavizadas Colinas altas	→ Colinas
Morros baixos suavizados Morros baixos	→ Morros Baixos
Morros altos suavizados Morros altos	→ Morros Altos

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40. Desempenho dos grupos de classe por tamanhos de janela móvel.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9. Desempenho do melhor tamanho de janela móvel para cada grupo de classe.

Grupo de classes	Janela	Desempenho
Terreno planos	40X40	0,816
Colinas	27X27	0,818
Morros baixos	32X32	0,767
Morros altos	28X28	0,826

Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível observar que na bacia do rio Corumbataí o grupo de Terrenos planos foi melhor delimitado a partir do maior tamanho de janela móvel (40x40), enquanto que as Colinas foram delimitadas a partir do menor tamanho de janela (27x27). Já os grupos de morros altos e morros baixos foram melhor delimitados por janelas intermediárias (28x28 e 32X32, respectivamente).

6.3.2 Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo

Como já explicitado, treze classes foram identificadas na área com as janelas personalizadas, sendo que 2 delas (Terrenos planos irregulares com relevo moderado e Colinas altas suavizadas) correspondem a mais de 55% da área total. A Tabela 10 apresenta as classes de padrões de formas semelhantes do relevo geradas, com suas respectivas áreas e porcentagens de ocorrência e a Figura 41 ilustra o mapa de padrões de formas semelhantes do relevo resultante das janelas personalizadas para cada grupo de classe.

Tabela 10. Classes de padrões de formas semelhantes do relevo geradas e respectivas áreas de ocorrência.

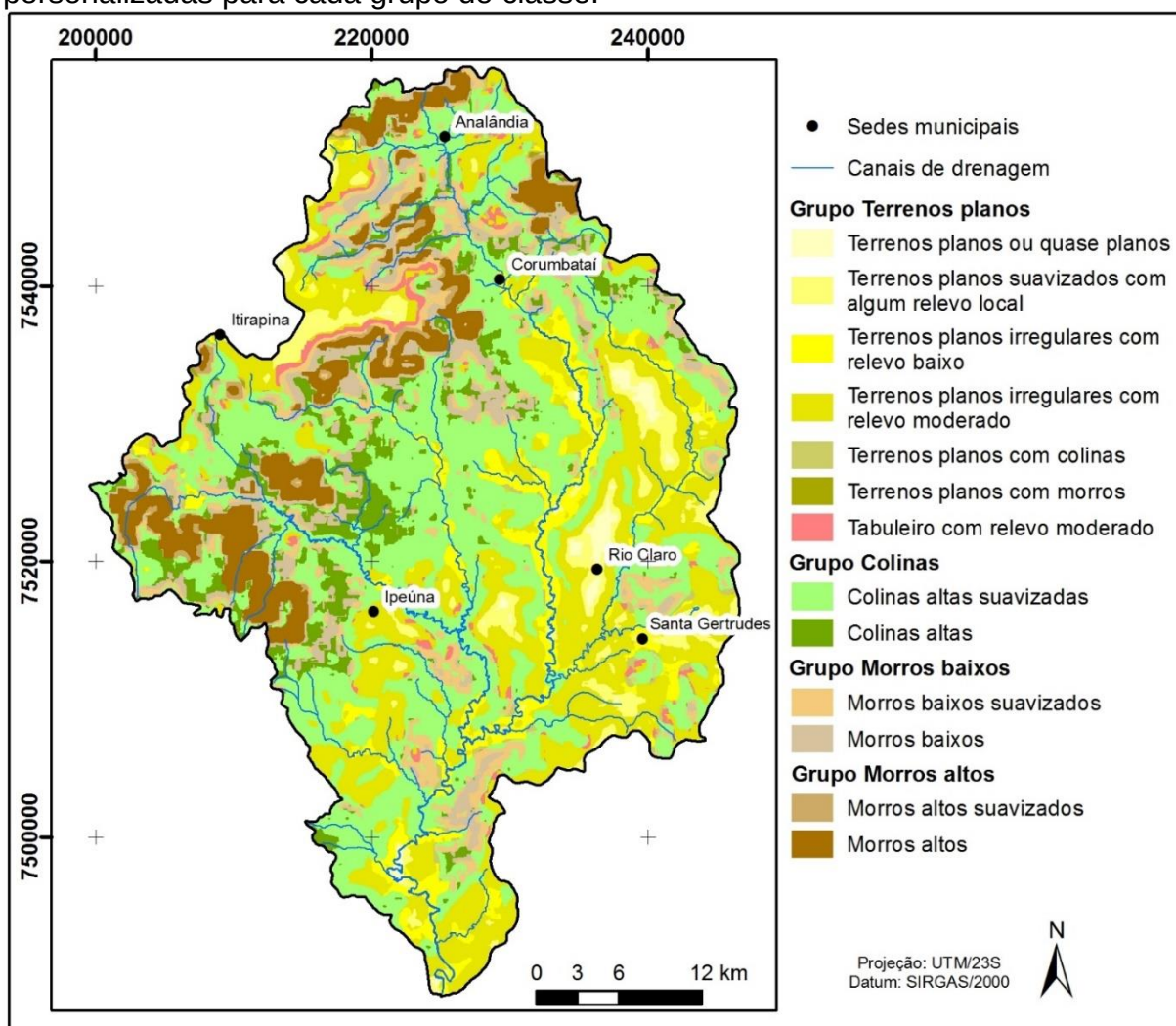
Classes	Área (km²)	Área (%)
Terrenos planos com morros	918000	0,05%
Terrenos planos com colinas	13715900	0,80%
Morros altos suavizados	16747500	0,98%
Tabuleiro com relevo moderado	24891000	0,99%
Terrenos planos ou quase planos	17564600	1,02%
Terrenos planos suavizados com algum relevo local	81061300	4,73%
Colinas altas	104679000	6,11%
Morros baixos	118212500	6,89%

Continua na próxima página.

Classes	Área (km ²)	Área (%)
Morros baixos suavizados	125500400	7,32%
Terrenos planos irregulares com relevo baixo	128343800	7,49%
Morros altos	132890500	7,75%
Terrenos planos irregulares com relevo moderado	372191700	22,17%
Colinas altas suavizadas	577802100	33,70%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41. Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo resultante das janelas personalizadas para cada grupo de classe.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Uma reclassificação foi realizada para classes geradas com áreas de ocorrência menores que 1% da área total mapeada, ou seja, com pouca representatividade espacial. Assim, essas classes foram reclassificadas para classes com características semelhantes, conforme mostra o Quadro 13. A Figura 42 ilustra o mapa de padrões de formas semelhantes do relevo após a etapa de reclassificação.

Quadro 13. Reclassificação das classes com áreas menores que 1% da área total mapeada.

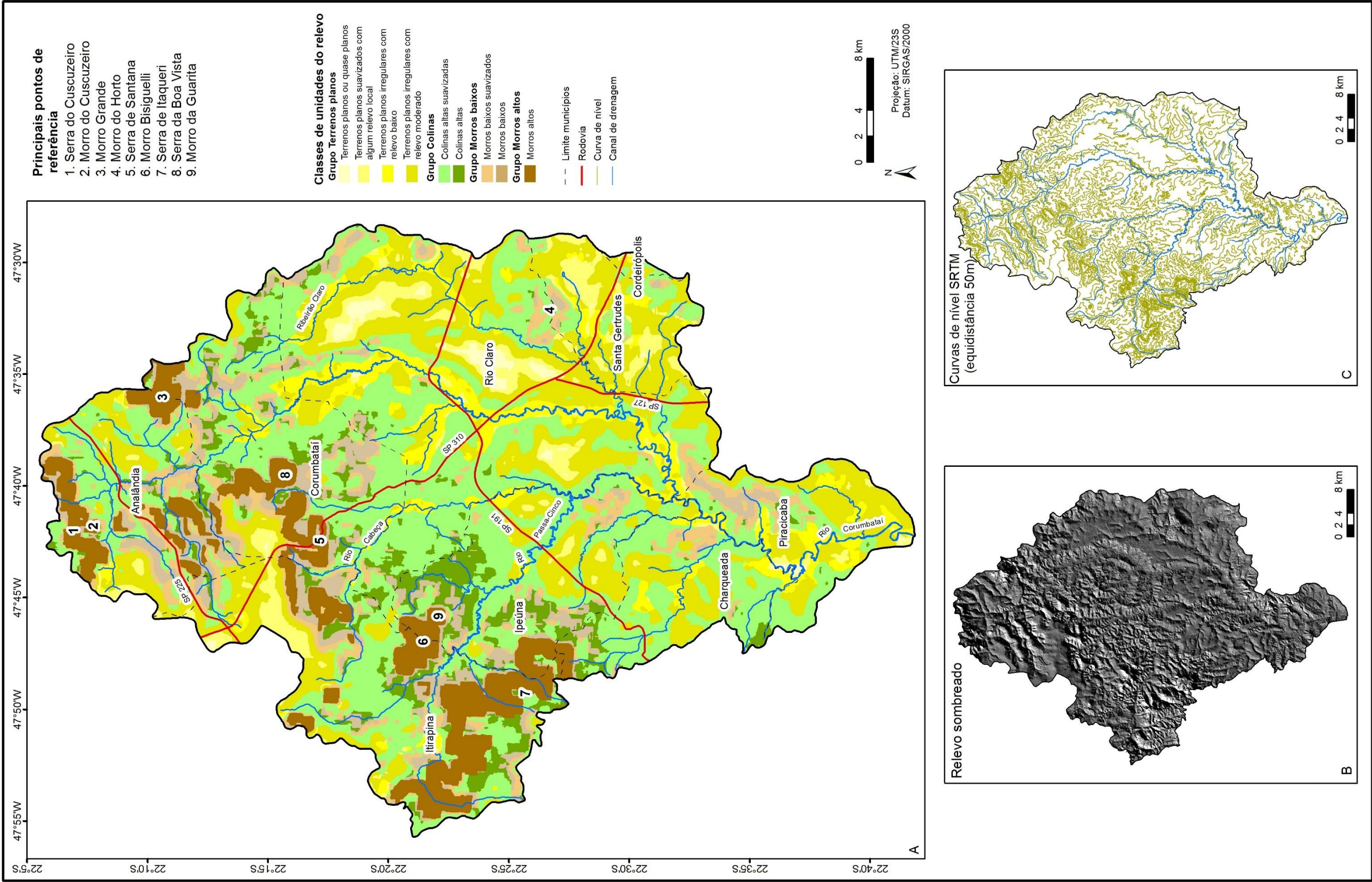
Classe original		Após reclassificação
Terrenos planos com morros	→	Terrenos planos irregulares com relevo moderado
Terrenos planos com colinas	→	Terrenos planos suavizados com algum relevo local
Morros altos suavizados	→	Morros altos
Tabuleiro com relevo moderado	→	Terrenos planos irregulares com relevo moderado

Fonte: Elaborado pelo autor.

6.3.3 Validação dos resultados

Esse mapa foi validado a partir dos dados de referência obtidos em campo e no escritório. De acordo com a categorização proposta por Landis e Koch (1977), o valor do coeficiente de concordância Kappa atingido – 90,3% - indica excelência na concordância com os dados de referência, o que representa, uma precisão quase perfeita na classificação dos grupos representativos das classes de formas de relevo. A Tabela 11 mostra a matriz de erro, o acerto geral e o coeficiente de concordância Kappa para o mapa de padrões de formas semelhantes do relevo após a etapa de reclassificação e a Tabela 12 apresenta a acurácia do usuário e a acurácia de produção para cada um dos grupos de classe de formas semelhantes do relevo.

Figura 42. Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo, após a etapa de reclassificação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 11. Matriz de erro e o coeficiente de concordância Kappa para o mapa de padrões de formas semelhantes do relevo após a etapa de reclassificação.

Dado Classificado	Dado de Referência				Total
	Terrenos planos	Colinas	Morros baixos	Morros altos	
Terrenos planos	52	3	0	0	55
Colinas	6	49	0	0	55
Morros baixos	0	6	49	0	55
Morros altos	0	0	1	54	55
Total	58	58	50	54	220
					Acerto geral= 92,73%
					Kappa= 90,3%

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 12. Acurácia do usuário e a acurácia de produção para o mapa de padrões de formas semelhantes do relevo após a etapa de reclassificação.

Grupos de classe	Acurácia do usuário	Acurácia de produção
Terrenos planos	94,54%	89,65%
Colinas	89,09%	84,48%
Morros baixos	89,09%	98%
Morros altos	98,18%	100%

Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir das Tabelas 11 e 12 é possível constatar que todas as classes tiveram um excelente desempenho na classificação frente aos pontos de validação, obtendo resultados entre 84,48% e 100%. O grupo de Morros altos destaca-se com o melhor desempenho na classificação, pois apresentou o valor mais alto de acurácia de produção (100%) e de acurácia do usuário (98,18%). Já os grupos de Colinas e Morros baixos concentraram os menores valores de acurácia do usuário, o que significa que há maior probabilidade de serem confundidos com outros grupos. No entanto, o valor elevado (89,09%), mostra que mesmo nesses grupos ocorreu pouca confusão nesse experimento.

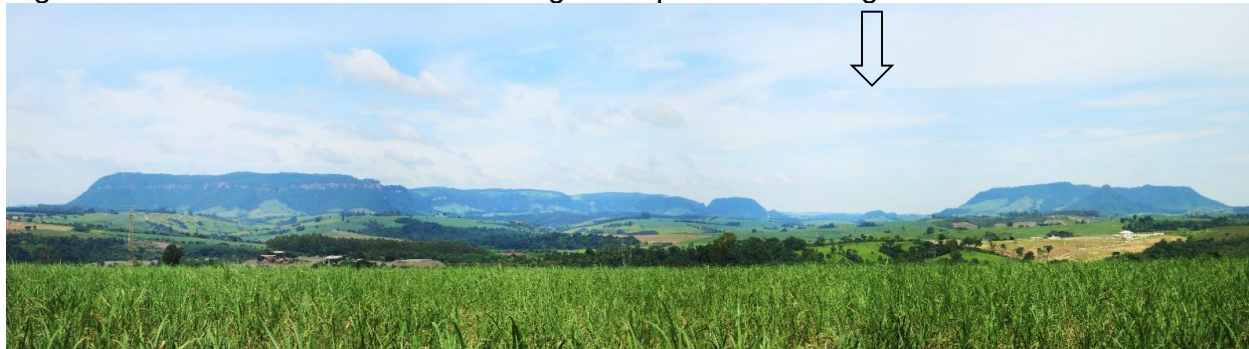
É importante enfatizar que foram validados os grupos de classes e não cada classe individualmente devido à dificuldade de diferencia-las em campo e na análise realizada em escritório.

Além da validação estatística, foi efetuada uma análise comparativa com outros estudos e mapeamentos produzidos na área. Observou-se, no entanto, que não há

trabalhos em escala de detalhe compatível a proposta nesse experimento (1:50.000). Há trabalhos que caracterizam a área em escalas pequenas (1:1.000.000 / 1:500.000) ou que abordam apenas fragmentos da bacia do rio Corumbataí. Esse fator dificultou o processo de conferência, mas foi possível estabelecer algumas relações entre os diferentes mapeamentos.

Na bacia do rio Corumbataí, a classe de Morros altos marca os limites entre a Depressão Periférica Paulista e as Cuestas Basálticas, como pode ser observado em toda parte oeste e norte da área. Os Morros altos vinculam-se às características clinográficas e morfológicas do *front* das cuestas, com altas declividades e vertentes ravinadas com perfis retilíneos. Essa classe é coincidente as delimitadas por Penteado (1976), Brasil (1979), IPT (1981) e Brasil (1983). IPT (1981) divide essa classe em Escarpas festonadas e Encostas com cânions locais e as enquadra no grupo de relevos de transição. Já Brasil (1983) classifica essa região de Unidade de Planaltos Residuais Cuestiformes e engloba nessa unidade os *fronts* e os reversos das cuestas. Brasil (1983) destaca na área as descontinuidades das cuestas ocorridas pela presença de erosão regressiva, que abre grandes anfiteatros de cabeceira, como pode ser observado nas Figuras 42 e 43, nas proximidades do Rio Passa-cinco.

Figura 43. Descontinuidade de relevo gerada pela erosão regressiva do rio Passa-cinco.

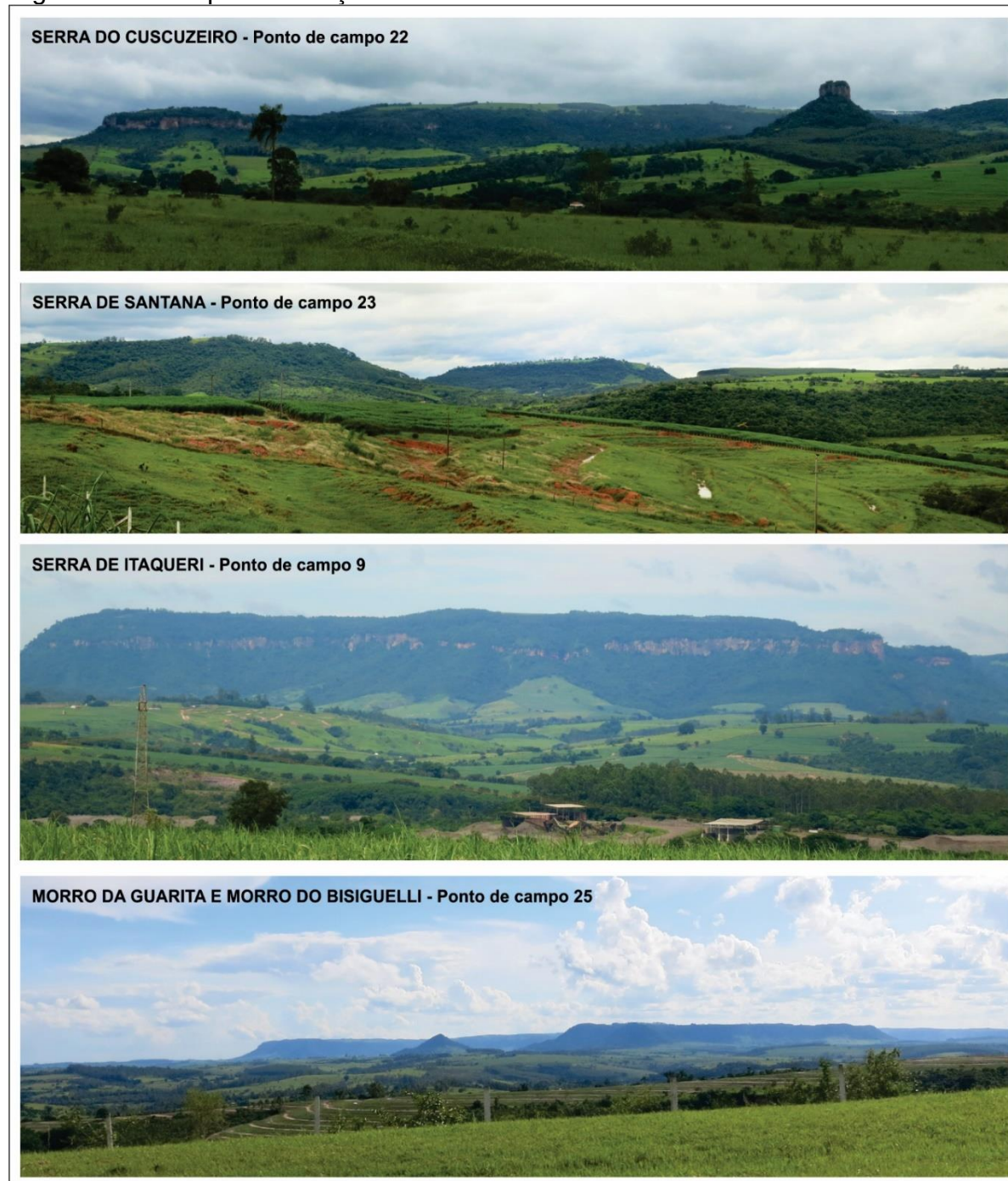


Fonte: Elaborado pelo autor.

A classe de Morros altos, segundo Almeida (1964), constitui uma faixa de relevo acidentado cuja gênese encontra-se intimamente vinculada aos derrames basálticos que ocorreram nessa área. Já Ab´Saber (1956) confirma a ocorrência desse *front* abrupto, de 250-300 metros de desnível voltado para o oriente, sendo os principais representantes

na região a Serra de Itaqueri, a Serra de Santana, a Serra do Cuscuzeiro e os Morros da Guarita e do Bisigueli, mapeados na Figura 42 e observados na Figura 44.

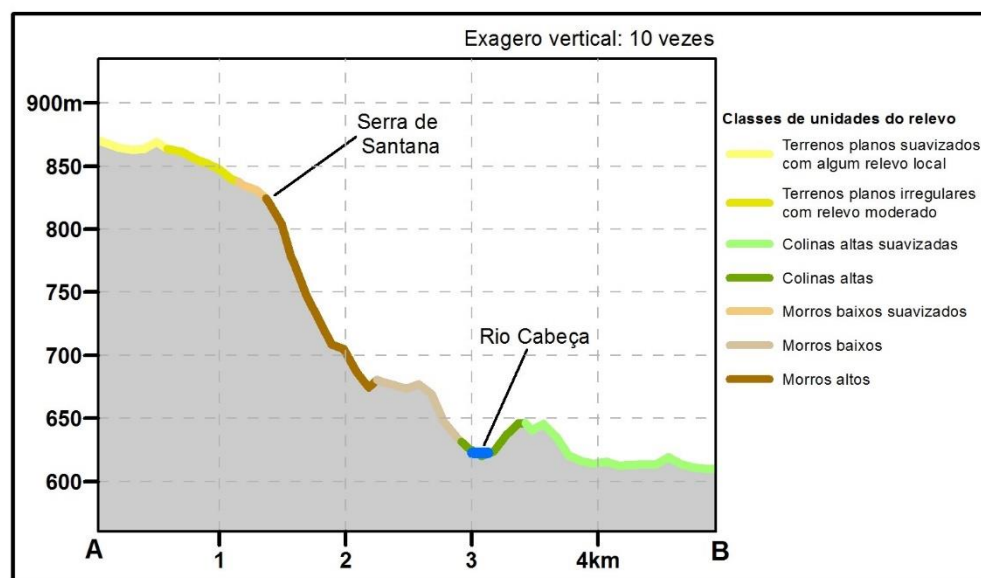
Figura 44. Principais formações cuestiformes ocorrentes na bacia do rio Corumbataí.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Já as classes de Morros baixos e Morros baixos suavizados delimitam, principalmente, um setor de transição entre a Depressão Periférica e as Cuestas arenito-basálticas na área, como pode ser observado na Figura 45. Onde o entalhamento é mais profundo, formaram-se relevos de morros baixos, geralmente de topos achatados, que correspondem ao produto do entalhamento de áreas colinosas pelos canais de drenagem antecedentes, aproveitando direções de fraqueza dadas pelas estruturas. Alguns topos amplos e suavizados destes morros contrastam com suas vertentes mais abrutadas e frequentemente ravinadas. IPT (1981) identifica essa classe na área e a denomina de Morrotes alongados e Espigões, cujas principais características são “interflúvios sem orientação preferencial, topos angulosos a achatados, vertentes ravinadas com perfis retilíneos e amplitudes locais inferiores a 100 metros”.

Figura 45. Perfil topográfico da área de transição entre as Cuestas arenito-basálticas e a Depressão Periférica.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na área de estudo, as classes de Morros baixos e Morros baixos suavizados ocorrem ainda relacionadas a corpos de diabásio na forma de diques e soleiras, que afloram no Horto Florestal de Rio Claro, conforme descrito e mapeado por Zaine (2000), e nas proximidades do ribeirão Claro, em toda borda leste e nordeste da área. A Figura 46 ilustra algumas ocorrências do grupo de Morros baixos na área de estudo.

Figura 46. Ocorrências do grupo de Morros baixos na área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Mais ao sul da área, nas proximidades do rio Corumbataí em Piracicaba, também aparecem Morros baixos e Morros baixos suavizados, mas esses podem ser associados a Formação Tatuí devido a estrutura geológica regional do Domo de Pitanga.

O grupo de Colinas foi identificado na área e descrito por autores variados como Penteado (1976), Brasil (1979), IPT (1981), Brasil (1983), Ross e Moroz (1997) e Zaine (2000). Assim como no mapeamento proposto, no qual esse grupo ocupa 39,81% da área, as colinas são citadas pelos autores (op. cit.) como a unidade predominante na área, tendo ocorrência distribuída por toda a extensão da bacia. Segundo Penteado (1976) e IPT (1981) grande parte dessas colinas encontram-se subniveladas e conservam nos topos os efeitos de superfície de aplanamento oriunda de alternâncias climáticas ocorridas até épocas subatuais.

As Colinas altas aqui mapeadas tem relações com as Colinas médias delimitadas por IPT (1981) e localizam-se próximas aos Morros baixos, integrando uma área de

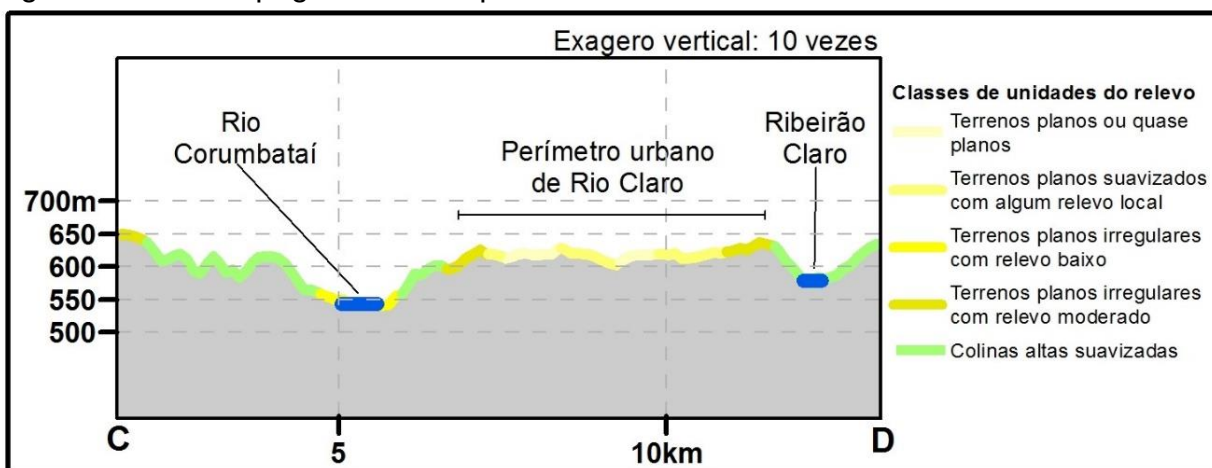
transição do relevo acidentado para o relevo suave, como observado na Figura 45. Essas Colinas altas apresentam vertentes convexas e são mais dissecadas devido a maior densidade de drenagem.

Já as Colinas altas suavizadas tem ocorrência mais vasta e se equivalem às Colinas amplas de IPT (1981), às Colinas suavemente convexas de Penteado (1981) e às Colinas de topos amplos tabulares e convexas de Ross e Moroz (1997). Nessa classe de formas denudacionais, predominam os interflúvios amplos, topos extensos e aplanados e vertentes com perfil de retilíneo a convexo. A ocorrência do grupo de Colinas pode ser observada na Figura 48.

Penteado (1981) descreve que essas colinas, com topos tabuliformes e patamares de fraca inclinação, aparecerem dispostas entre 550 e 650 metros, desdobrando-se em patamares escalonados que terminam sobre a várzea dos rios principais.

A escala de maior detalhe empregada nesse mapeamento mostra que as colinas delimitadas por Penteado (1976), IPT (1981) e Ross e Moroz (1997) tiveram aqui particularidades definidas e a ferramenta proposta, no geral, separou os topos aplainados das encostas convexas, gerando assim dois grupos de classes, como pode ser observado na Figura 47. Esses topos aplainados das colinas podem ser associados às superfícies de aplainamento definidas por Penteado (1976): Superfície Rio Claro (600 – 650m) e Superfície Urucaia (690 – 720m).

Figura 47. Perfil topográfico da Superfície Rio Claro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48. Ocorrências do grupo de Colinas na área de estudo.

COLINAS ALTAS SUAVIZADAS PRÓXIMO A ANALÂNDIA - Ponto de campo 22



COLINAS ALTAS SUAVIZADAS EM CORUMBATÁ - Ponto de campo 31



COLINAS ALTAS PRÓXIMO A SERRA DE SANTANA - Ponto de campo 23



COLINAS ALTAS PRÓXIMO A CHARQUEADA - Ponto de campo 45



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os Terrenos planos foram o segundo grupo de maior ocorrência no mapeamento aqui proposto, ocupando 35,41% da área da bacia. No entanto, nos mapeamentos anteriormente citados a título de comparação não há nenhuma referência a forma de terrenos planos, mas há ampla ocorrência das colinas, sendo algumas unidades de colinas com topos aplainados, como já explicado.

A utilização do termo “Terrenos planos”, traduzido da tabela proposta por Dikau, Brabb e Mark (1991), pode ser um dos motivos da diferença entre as classes obtidas nos mapeamentos. No Brasil, onde prepondera o clima tropical úmido, há o predomínio de formação de encostas convexas e assim, os pesquisadores não empregam comumente o termo “terrenos planos”, mas sim “superfícies de aplainamento ou topos aplainados”. Como a metodologia proposta pode ser aplicável em qualquer área do planeta, aconselha-se que em cada área estudada haja uma avaliação e adaptação dos termos para o tipo de relevo a ser classificado.

Na área de estudo foram identificados quatro tipos de terrenos planos que ocorrem de forma bastante distribuída (Terrenos planos ou quase planos, Terrenos planos suavizados com algum relevo local, Terrenos planos irregulares com relevo baixo e Terrenos planos irregulares com relevo moderado). Esses terrenos planos têm, no entanto, três origens diferentes. Há os topos aplainados, ou seja, topos de colinas que passaram por um processo de aplainamento durante um período quente e seco no passado (final do Terciário e no Quaternário), e atualmente se encontram nivelados entre 600 e 650 metros, conforme descrito por Penteado (1976). Há também as planícies aluviais, situadas abaixo dos 550m e associadas aos fundos de vale dos grandes rios presentes na área, como rio Corumbataí, o ribeirão Passa-cinco e o ribeirão Claro. E há ainda os terrenos suaves no reverso das cuestas, característicos dos solos e arenitos da Formação Botucatu e das rochas da Formação Itaqueri. Estes estariam situados em cotas acima dos 800m de altitude e poderiam ser associados a Superfície Santana (800m) e Superfícies Cuscuzeiro e Itaqueri (1000m) definidas por Penteado (1976).

A Figura 49 ilustra algumas ocorrências dos Terrenos planos da área de estudo.

Figura 49. Ocorrências dos Terrenos planos na área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Após essa análise comparativa com outros estudos e mapeamentos produzidos na área, observou-se que o mapa final de padrões de formas semelhantes do relevo, produzido nesse trabalho, mostrou-se concordante, de modo geral, com as descrições já realizadas. O nível de detalhe do mapeamento proposto e a nomenclatura utilizada gerou algumas divergências entre as classes comparadas, pois as formas de relevo foram aqui detalhadas. No entanto, as descrições realizadas por outros pesquisadores corresponderam à morfometria do relevo e às respectivas áreas de ocorrência.

A metodologia de classificação das formas de relevo a partir de uma janela personalizada mostrou resultados estatísticos com alto grau de concordância com as amostras, o que pode ser considerado uma evolução em relação ao Experimento 2. A janela móvel personalizada para cada grupo de classe superou o problema do tamanho único de janela móvel para a classificação de todas as classes. Essa melhoria possibilitou que a etapa de análise espacial posterior a classificação fosse eliminada, porém alguns pontos ainda precisam ser considerados.

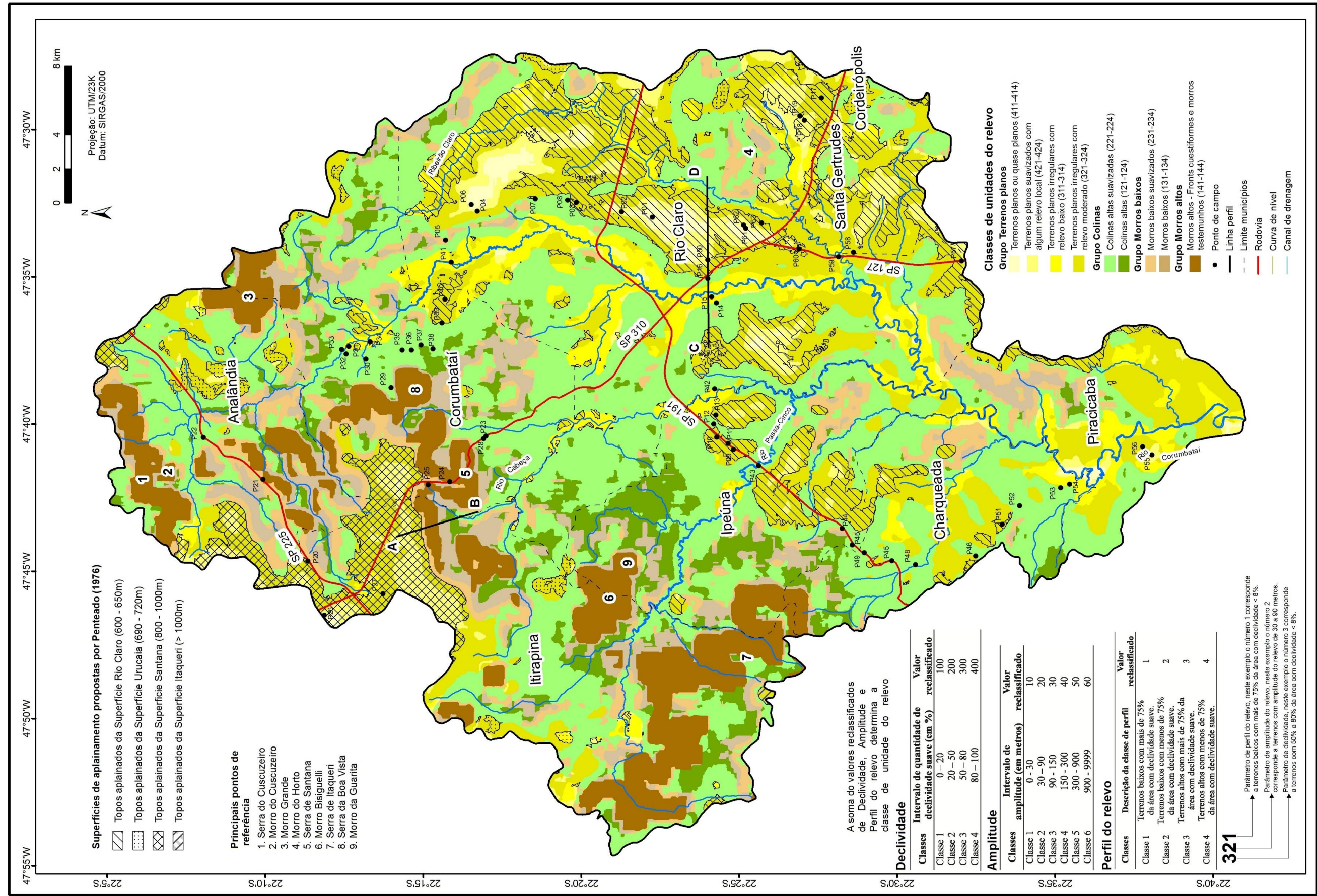
O mapa de forma semelhantes do relevo ilustrado na Figura 42 é apresentado em escala 1:285.000, mas como foi gerado a partir de dados SRTM de 30 metros de resolução, o mapa é compatível a escala planimétrica de até 1:50.000.

O parâmetro perfil do relevo novamente não exerceu influência sobre os resultados obtidos. Na área estudada, onde foram observados terrenos planos em pelo menos quatro patamares topográficos (Superfícies de Penteado, 1976), esperava-se que esse parâmetro tivesse contribuído para a diferenciação das classes, o que não ocorreu. Os tabuleiros identificados tiveram ocorrência muito restrita e mesmo com o aumento da janela, não houve melhora.

Outro ponto observado nesse experimento foi com relação a nomenclatura traduzida das classes. O termo “terrenos planos” não é comumente empregado no Brasil, mas como a metodologia proposta pode ser aplicável em qualquer área do planeta, optou-se por mantê-lo na Figura 42 e aconselhar que em cada área estudada haja uma avaliação e adaptação dos termos para o tipo de relevo a ser classificado. Na área estudada no Experimento 3, optou-se por produzir um mapa final com uma máscara adaptada a características da área, como mostra a Figura 50, onde as superfícies de aplainamento propostas por Penteado (1976) passaram a sobrepor as classes de

Terrenos planos correspondentes a altimetria indicada pela autora. Além disso, a classe de Morros altos teve a nomenclatura adaptada para “*fronts cuestiformes*”, característicos da área. Essa última observação mostra que o conhecimento da área pelos autores é muito importante para um bom resultado do mapeamento

Figura 50. Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo da bacia do rio Corumbataí.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6. CONCLUSÃO

O crescente uso de modelos digitais de elevação tem permitido uma maior dinamicidade aos estudos e pesquisas do meio físico, pois reduz a distância entre o objeto de estudo e o pesquisador. Os experimentos realizados nesse trabalho mostram que os MDEs podem auxiliar desde no reconhecimento de uma área até estudos específicos de compartimentação do relevo.

No Experimento 1 o objetivo foi alcançado na medida em que as quatro técnicas de visualização de modelos digitais de elevação foram testadas e avaliadas, além das quatro visualizações combinadas propostas. As combinações destacam-se como um avanço em relação às técnicas testadas individualmente, pois agregam propriedades texturais que possibilitam uma melhor visualização de características como profundidade e forma.

A visualização combinada 1 (modelo digital de elevação + relevo sombreado), tão utilizada atualmente em diversos estudos, se mostrou a menos relevante das combinações testadas pois é muito influenciada pelo viés da iluminação. Caso se opte por utilizá-la, seria importante trabalhá-la conjuntamente com a visualização combinada 2 (modelo digital de elevação em uma escala de cores + declividade), pois essa permite uma visualização imparcial do relevo e propicia uma análise interpretativa mais detalhada.

Recomendam-se, no entanto, como melhores técnicas de visualização dos MDEs as visualizações combinadas 3 (Composição colorida entre os azimutes 50° e 320°) e 4 (Composição colorida entre os azimutes 50° e 320° + declividade). Os produtos gerados a partir dessas composições coloridas permitem o reconhecimento de feições do relevo em um nível de detalhe maior que em todas as técnicas testadas nesse trabalho e são mais fiéis às formas reais do relevo, graças ao uso de dois azimutes de iluminação.

Considera-se que cada uma das técnicas testadas ressalta características específicas do relevo e os resultados obtidos podem ser mais ou menos satisfatórios de acordo com as características da área estudada e a escala de trabalho. Apesar de ter sido apresentada uma proposta baseada em dados SRTM, todas as técnicas sugeridas podem ser aplicadas para a visualização de MDEs obtidos de outras fontes e em diferentes escalas, podendo até utilizar-se de diferentes elementos de análise do relevo.

Com relação aos Experimento 2 e 3, entende-se que a metodologia de classificação das formas de relevo, adaptada de Hammond (1954, 1964) e Dikau, Brabb e Mark (1991) mostrou-se bastante viável para aplicação em áreas de relevos movimentados e suavizados, no entanto, alguns fatores precisam ser considerados.

Quanto aos parâmetros de classificação propostos por Hammond (1954, 1964) – declividade, amplitude (relevo local) e perfil do relevo - observou-se que o perfil do relevo teve pouca influência, sendo considerado apenas na diferenciação entre Tabuleiros e Terrenos planos. Assim, o parâmetro perfil do relevo praticamente não exerceu influência sobre o resultado obtidos, visto que as classes de tabuleiros não apresentaram áreas significativas nas regiões estudadas. Sugere-se para um estudo futuro uma investigação mais aprofundada sobre esse parâmetro, especificamente sobre sua escala de detalhe.

O ponto crítico observado no Experimento 2, relacionado ao tamanho da janela móvel que determinava quais formas do relevo seriam integralmente ou parcialmente detectadas e quais formas seriam suprimidas, foi superado no Experimento 3. Conclui-se assim que não existe um tamanho de janela ideal para todas as formas do relevo, sendo importante avaliar o melhor tamanho de janela para cada uma das formas. No teste realizado no Experimento 3, com a bacia do rio Corumbataí, os resultados estatísticos foram melhores que no Experimento 2, mostrando maior concordância com as amostras e comprovando que a janela móvel personalizada para cada grupo de classe foi uma evolução na metodologia.

A partir da análise dos Experimentos 2 e 3, foi possível estabelecer uma relação entre o tamanho da janela móvel e a dimensão horizontal de cada forma do relevo. Formas como montanhas e terrenos planos, que caracterizaram-se nas áreas estudadas por uma dimensão horizontal maior, foram melhor mapeados por janelas móveis maiores. Já formas como colinas e morros, que caracterizaram-se por uma dimensão horizontal menor, foram melhor mapeados por janelas móveis menores.

No Experimento 3 não foi necessária uma análise de contexto espacial complementar à metodologia de classificação para superar as limitações encontradas com o tamanho da janela móvel, no entanto o conhecimento da área ainda foi essencial para perceber as diferenças entre todos os Terrenos planos mapeados e uma divergência na nomenclatura utilizada por diferentes pesquisadores. Apesar das classes de Terrenos

planos ocorrerem em diferentes patamares altimétricos, as características morfométricas eram semelhantes. O uso de uma máscara com as superfícies de aplainamento ocorrentes na área foi a solução proposta para mostrar a ocorrência desses patamares.

Recomenda-se para estudos futuros de aplicação da ferramenta desenvolvida nesse trabalho que sempre ocorra uma revisão entre os termos da bibliografia e os termos traduzidos de Dikau, Brabb e Mark (1991), além de uma investigação sobre as peculiaridades da área estudada para que o mapa final de classificação automatizada das formas do relevo possa ser adequado ou compatibilizado a características da mesma.

Por fim, sugere-se uma experimentação com variações nos limiares dos parâmetros declividade, amplitude e perfil do relevo para maximizar o ajuste entre o mapeamento e as amostras de validação. O limiar de 8% de declividade estipulado por Hammond (1954, 1964), por exemplo, pode ser modificado para adequar-se melhor a características de áreas mais escarpadas ou mais aplainadas. Além disso, diferentes valores nos intervalos de classes para a definição da amplitude também podem ser experimentados buscando-se diminuir a confusão entre algumas classes, como colinas e morros, conforme observado no Experimento 2.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. A terra paulista. **Boletim Paulista de Geografia**, n. 23, p. 5-38, 1956.
- AB'SABER, A. N. Posição das superfícies aplainadas no Planalto Brasileiro. **Notícia Geomorfológica**, n.5, p. 52-54, 1960.
- AB'SABER, A. N., 1969. Províncias geológicas e domínios morfoclimáticos no Brasil. **Geomorfologia**, n.20, p.1-26, 1969.
- AB'SABER, A. N.; BERNARDES, N. Vale do Paraíba, Serra da Mantiqueira e arredores de São Paulo. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE GEOGRAFIA, 18, 1958, Rio de Janeiro. **Guia de excursões**. Rio de Janeiro: AGB, 1958. Vol. 4, p. 1-303.
- ADEDIRAN, A. O. et al. Computer-assisted discrimination of morphological units on north-central Crete (Greece) by applying multivariate statistics to local relief gradients. *Geomorphology*, v. 58, n. 1-4, p. 357-370, 2004. ISSN 0169-555X.
- ALMEIDA, F. F. M. de. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim Instituto Geográfico e Geológico**, São Paulo, n. 41, p. 169-263. 1964.
- ALMEIDA FILHO, R.; PARADELLA, W.R. **Estudo do maciço alcalino de Poços de Caldas através de imagens Landsat com ênfase em mineralizações radioativas**. São José dos Campos: INPE, 1977. 130p.
- AMARAL, G.; BUSHEE, J.; CORDANI, U.G.; KAWASHITA, K.; REYNOLDS, J.H. Potassium-argon ages of alkaline rocks from southern Brazil. **Geochim. Cosmochim. Acta**, 31, p. 117-142, 1967.
- ARNOT, R.H. & GRANT, K. **Land Classification for Urban Growth**. Melbourne: CSIRO - Division of Applied Geomechanics Research Paper n. 230, [s.p.], 1974.
- ARRELL, K. E. et al. A fuzzy c-means classification of elevation derivatives to extract the morphometric classification of landforms in Snowdonia, Wales. **Computers & Geosciences**, v. 33, n. 10, p. 1366-1381, 2007. ISSN 0098-3004.
- AUGUSTIN, C.H.R.R.; FONSECA, B. M.; ROCHA, L.C. Mapeamento geomorfológico da Serra do Espinhaço Meridional: primeira aproximação. **Geonomos**, v. 19, n. 2, p. 50-69, 2011.
- AZEVEDO, A. D. O planalto brasileiro e o problema da classificação de suas formas de relevo. **Boletim Paulista do Geografia**, n. 2, p. 43-50, 1949.
- BARBOSA, O. Nota sobre algumas rochas da região de Poços de Caldas. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 6, n. 4, p. 211 – 219, 1934.

BARBOSA, O. **Notas preliminares sobre o Planalto de Poços de Caldas e suas possibilidades econômicas**. SFPM / DNPM, Avulso 8, 33 p., 1936.

BARBOSA, O. Sobre a idade das rochas alcalinas e a origem do Planalto de Poços de Caldas. **Mineração e Metalurgia**, v. 13, n. 76, p. 235 – 236, 1948.

BECKETT, P.H.T. & WEBSTER, R. The Storage and Collation of Information on Terrain. **Military Engineering Experimental Establishment Interim Report**, Christchurch, n. 871, 1962.

BEHRENS, T.; ZHU, A.; SCHMIDT, K.; SCHOLTEN, T. Multi-scale digital terrain analysis and feature selection for digital soil mapping. **Geoderma**, n. 10258, pp. 11, 2009.

BELCHER, D.J. Use of Aerial Photographs in War Time Engineering. **Rds. Str.**, [s.l.], v. 85, n. 7, p. 35, 1942.

BERTANI, T. D. C.; ROSSETTI, D. D. F.; ALBUQUERQUE, P. C. G. Object-based classification of vegetation and terrain topography in Southwestern Amazonia (Brazil) as a tool for detecting ancient fluvial geomorphic features. **Computers & Geosciences**, v. 60, p. 41-50, 2013.

BERTRAND, G. Paysage et Géographie Physique Globale: **Revue Géographique des Pyrénées et du Sud-Ouest**, Toulouse, v. 39, n. 3, p. 249-272, 1968.

BETTÚ, D. F. **Nova metodologia probabilística multivariada para mapeamento de unidades de paisagem geomórficas**. 2012. 211 f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012

BJORNBERG, A.J.S. Rochas clásticas do planalto de Poços de Caldas. **Boletim Faculdade de Filosofia, Ciencias e Letras - USP**, São Paulo, v. 237, n.18, p.64-121, 1959.

BJORNBERG, A.J.S.; LANDIM, P.M.B. Contribuição ao estudo da Formação Rio Claro (Neoceno-zóico). **Boletim Sociedade Brasileira Geologia**, v.15, n. 4, p. 43-67, 1966.

BOCCO, G.; MENDOZA, M.; VELAZQUEZ, A. Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping—a tool for land use planning in developing countries. **Geomorphology**, v. 39, p. 211–219, 2001.

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists**. Elsevier Science: Oxford, 416p., 1994.

BOURNE, R. Regional survey and its relation to stock taking of the resources of the British Empire. **Oxford Forestry Mem.**, v. 13, p. 16-18, 1931.

BRABYN, L. K. **Landscape classification using GIS and national digital databases**. 1996. 256 f. Doutorado (Doctor of Philosophy) - Department of Geography, University of Canterbury, New Zealand, 1996.

BRABYN, L. K. Classification of macro landforms using GIS. **ITC Journal**, v. 1, p. 26-40, 1998.

BRANCO, J.J.R. **Notas sobre a geologia e petrografia do planalto de Poços de Caldas, MG**. Belo Horizonte: Universidade de Minas Gerais, Escola de Engenharia, Inst. Pesq. Radioativas, publ. n.5, 72p. 1956.

BRASIL - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Projeto Sapucaí: Estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo**. Relatório Final de Geologia. Brasília: DNPM/CPRM, Superintendência Regional de São Paulo: 299 p., 1979.

BRASIL -. **Projeto RADAMBRASIL, Folha SF.23/24 Rio de Janeiro/Vitória :geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra**. Projeto RADAMBRASIL. Rio de Janeiro: Departamento Nacional da Produção Mineral, 1983.

BURROUGH, P. A.; VAN GAANS, P. F. M.; MACMILLAN, R. A. High-resolution landform classification using fuzzy k-means. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 113, n. 1, p. 37–52, 2000.

CARR, J. R. Spectral and textural classification of single and multiple band digital images. **Computers & Geosciences**, v. 22, n. 8, p. 849-865, 1996. ISSN 0098-3004.

CAILLEUX, A.; TRICART, J. Le problème de la classification des faits géomorphologiques. **Annales de Géographie**, v. 65, n. 349, p. 162-186, 1956.

CAMARGO, F. F. **Análise orientada a objeto aplicada ao mapeamento de unidades geomorfológicas a partir de dados ASTER/Terra**. 2008. 171 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Departamento de Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

CARVALHO, T. M.O. **Efeitos de um licor cáustico na resistência ao cisalhamento de um solo residual de sienito e um coluvionar indeformados**. 2007. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2007.

CARR, J. R. Spectral and textural classification of single and multiple band digital images. **Computers & Geosciences**, v. 22, n. 8, p. 849-865, 1996. ISSN 0098-3004.

CASSETI, V. **Geomorfologia**. 2005. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia>>. Acesso em: 02/05/2013.

CEAPLA. Centro de Estudos e Planejamento Ambiental. **Atlas Ambiental da Bacia do Rio Corumbataí**. 2000. Disponível em: <<http://ceapla2.rc.unesp.br/atlas/>>. Acesso em: 12/06/2015.

CEPLAB. **Mapa geomorfológico do Estado da Bahia**, escala 1:1.000.000. Salvador: Secretaria de Planejamento, Ciência e Tecnologia, 1980.

CHRISTIAN, C. S. The concept of land units and land systems. In: PACIFIC SCIENCE CONGRESS, 9, 1958, Bangkok. **Proceedings...** Bangkok: Secretariat Ninth Pacific Science Congress, 1958. Vol. 20, p. 75-81.

CHRISTIAN, C.S. & STEWART, G.A. **General Report on Survey of the Katherine-Darwin Region**. Sidney : CSIRO - Australian Land Research Series n. 1. 1953.

CHRISTOFOLETTI, A. **Análise morfométrica das bacias hidrográficas do planalto de Poços de Caldas (MG)**. 1970. 215 p. Tese de Livre-Docência, Cadeira de Geografia do Brasil, Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Rio Claro, Rio Claro, 1970.

CHRISTOFOLETTI, A. Características fisiográficas do Planalto de Poços de Caldas (MG, Brasil). **Geomorfologia**, n. 32, p. 1-26, 1972.

CHRISTOFOLETTI, A. A. A unidade morfoestrutural do planalto de Poços de Caldas. **Notícias Geomorfológicas**, v. 13, n. 26, p. 77-85, 1973.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2a. São Paulo: Edgar Blucher, 1980. 188 p.p.

COELHO, A.L.N.; GOULART, A.C.O.; BERGAMASCHI, R.B. Mapeamento geomorfológico do estado do Espírito Santo. In: SIMPOSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 9, 2012, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: UGB, 2012, p. 1-2.

COLTRINARI, L. Cartografia geomorfológica detalhada: a representação gráfica do relevo entre 1950-1970 **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 3, p. 121-129, 2011.

CONGALTON, R.G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices**. New York: Lewis Publishers, 2009.

COOKE, R. U.; DOORNKAMP, J. C. **Geomorphology in environmental management: a new introduction**. 2a. Oxford: Clarendon Press, 1990. 410p.

CPRM Serviço Geológico do Brasil. **Projeto Rio de Janeiro: geomorfologia**. Rio de Janeiro: CPRM; 2000. 1CD-ROM.

DAVIS, W. M. The Geographical Cycle. **Geographical Journal**, v. 14, n. 5, p. 481-504, 1899.

DEFONTAINES, P. Regiões e paisagens do estado de São Paulo; primeiro esboço de divisão regional. **Geografia**, v. 1, n. 2, p. 117-169, 1935.

DEMEK, J. Generalization of geomorphological maps. In: PROGRESS MADE IN GEOMORPHOLOGICAL MAPPING, 9, 1967, Brno, Czech Republic. **Proceedings...** Geograficky ustv CSAV, 1967. p.36-72.

DEMEK, J., EMBLETON, C. (Eds.). **Guide to Medium-Scale Geomorphological Mapping**. Stuttgart: Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, 1978. 348 pp

DEMEK, J.; EMBLETON, C.; GELLERT, J.; VERSTAPPEN, H. (Eds.). **Manual of detailed geomorphological mapping**. Prague, Czechoslovakia: Academia (International Geographical Union, Commission on Geomorphological Survey and Mapping), 1972. 344p.

DERBY, O.A. On nepheline rocks in Brasil, with special reference to the association of phonolyte and foyaite. **Quart. Jour. Geol. Soc.**, London, v. 43, p.457-473, 1887.

DIKAU, R. et al. Morphometric landform analysis of New Mexico **Z. Geomorphol. Suppl.**, v. 101, p. 109-126, 1995.

DIKAU, R.; BRABB, E. E.; MARK, R. M. -. **Landform Classification of New Mexico by Computer**. EUA: U.S. Geological Survey, 1991. 15p.

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

DRÄGUT, L.; EISANK, C. Automated classification of topography from SRTM data using object-based image analysis In: GEOMORPHOMETRY, 2, 2011. Redlands. **Proceedings...** Redlands: Esri, 2011. p.113-116.

DRÄGUT, L.; EISANK, C. Automated object-based classification of topography from SRTM data. **Geomorphology**, v. 141-142, p. 21-33, 2012.

DRÄGUT, L.; SCHAUPPENLEHNER, T.; MUHAR, A.; STROBL, J.; BLASCHKE, T. Optimization of scale and parametrization for terrain segmentation: An application to soil-landscape modeling. **Computers & Geosciences**, v. 35, p.1875-1883, 2009.

EHSANI, A. H.; QUIEL, F. Geomorphometric feature analysis using morphometric parameterization and artificial neural networks. **Geomorphology**, v. 99, n. 1-4, p. 1-12, 2008.

ELLERT, R. Contribuição à Geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. **Bol. Fac. Fil. Ciên. Letras USP**, v. 237, n. 18, p. 5-63, 1959.

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

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Súmula da X reunião técnica de levantamento de solos**. Rio de Janeiro: SNLCS, 1979.

ESRI. **ArcGIS 10.1 for Desktop**. Redlands: ESRI, 2011. Cópia digital.

ETCHEBEHER, M. L. C.; CASADO, F. C.; MORALES, N. Análise fluviomorfométrica do rio Corumbataí (SP) – implicações morfotectônicas vinculadas à migração de nickpoint. **Revista UnG - Geociências**, Guarulhos, v.10, n.1, pag. 74-94, 2011. Disponível em: <<http://revistas.ung.br/index.php/geociencias/article/viewFile/956/983>>. Acesso em: 10/08/2015.

EVANS, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistics. In: CHORLEY, R. J. (Ed.). **Spatial Analysis in Geomorphology**. New York: Harper and Row, 1972. p.17-90.

EVANS, L. S.; MCCLEAN, C. J. The land surface is not unifractal: variograms, cirque scale and allometry. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 101, p. 127-147, 1995.

FELÍCISIMO, A. M. Parametric statistical method for error detection in digital elevation models ISPRS. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 49, n. 4, p. 29-33, 1994.

FENNEMAN, N.M. Physiographic divisions os the United States. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 6, p. 19-98, 1916.

FENNEMAN, N.M. **Physiography of Western United States & Physiography of Eastern United States**. New York: McGraw-Hill, 1938.

FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia - Conceitos e Tecnologias Atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FRAENKEL, M.O.; SANTOS, R.C.; LOURENÇO, F.E.V.L.; MUNIZ, W.S. Jazida de urânio no planalto de Poços de Caldas, Minas Gerais. In: DNPM. **Principais depósitos minerais do Brasil**. DNPM, v.1, cap.5, p. 89-103, 1985.

GALLANT, J.C.; HUTCHINSON, M. F. Scale dependence in terrain analysis. **Mathematics and Computers in Simulation**, v.43, p. 313-321, 1997.

GERASIMOV I. P. **Essai d'interprétation géomorphologique du schéma général de la structure géologique de l'URSS**. Problemes de Geographie Physique. Moscou, 1946. Vol.12.

GERASIMOV I. P. **Les traits de la structure du relief de la surface de la Terre en territoire de l'URSS et leur sources**. Moscou, 1959.

GERASIMOV, I.P.; MESCHERIKOV, J. A. Morphostructure. In: FAIRBRIDGE, R. W. (Ed.). **The encyclopedia of geomorphology**. New York: Reinhold Book Co., 1968. p. 131-132.

GHIMIRE, M. Multivariate morphological characteristics and classification of first-order basins in the Siwaliks, Nepal. **Geomorphology**, v. 204, n. 1, p. 192–207, 2014.

GIMBARZESKY, Ph. Land inventory interpretation. **Photogramm Eng.**, v. 32, n. 6 p. 967-976, 1966.

GOODCHILD, M.F.; QUATTROCHI, D.A. Scale, multiscaling, remote sensing and GIS. In: GOODCHILD, M.F.; QUATTROCHI, D.A. (Eds.). **Scale in Remote Sensing and GIS**. London: CRC Press, 1997. p. 1-11.

GORINI, M. A. V. Physiographic classification of the ocean floor: a multi-scale geomorphometric approach. In: GEOMORPHOMETRY, 1, 2009, Zurich, Suíça. **Proceedings...** University of Zurich, 2009. p.98-105.

GORINI, M. A. V.; MOTA, G. L. A. Análise geomorfométrica multiescala de modelos numéricos de terreno. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR)., 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 1333-1340. Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW/39ULKQH>>. Acesso em: 10 maio 2014.

GRANT, K. Terrain Evaluation: a logical extension of Engineering Geology. In: ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGISTS, 1, 1970, Paris. **Proceedings...** Paris: AEG, 1970, v. 2, p. 971-980.

GRANT, K. **The PUCE programme for terrain evaluation for engineering purposes**. Victoria: CSIRO, 1975.

GROHMANN, C. H. **Análise digital de terreno do centro-leste brasileiro**. 2008. 368 f. Tese (Doutorado em Geoquímica e Geotectônica) - Programa de Pós-Graduação em Geoquímica e Geotectônica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

GROHMANN, C. H.; RICCOMINI, C.; STEINER, S. S. Aplicações dos modelos de elevação SRTM em geomorfologia. **Revista Geográfica Acadêmica**, Paricarana, v.2, n.2, p. 73-83, 2008.

GUIMARÃES, D. The zirconium ore deposits of the Poços de Caldas Plateau, Brasil and zirconium geochemistry. **Boletim do Instituto de tecnologia industrial do Estado de Minas Gerais**, Belo Horizonte, n.6, p. 45-79, 1948.

GUSTAVSSON, M. **Development of a Detailed Geomorphological Mapping System and GIS Geodatabase in Sweden**. 2006. 36 f. Tese (Doutor em Filosofia). Uppsala University, Sweden, 2006.

HAMMOND, E. H. Small scale continental landform maps. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 54, p. 32-42, 1954.

HAMMOND, E. H. Analysis of properties in landform geography: An application to broadscale landform mapping. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 54, n. 1, p. 11-19, 1964.

HASUI, Y. A Formação Uberaba. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 22, 1968, Belo Horizonte. **Resumos...** Belo Horizonte: SBG, 1968. p. 64.

HAYDEN, R. S. Geomorphological Mapping. In: SHORT, N. M. B. J., R. W. (Ed.). **Geomorphology from space**. Washington, USA: NASA, 1986. p.637-656.

HENGL, T. et al. Geostatistical modelling of topography using auxiliary maps. **Computers & Geosciences**, v. 34, n. 12, p. 1886-1899, 2008.

HOFMANN, W.P.; FLECKENSTEIN, J.B. Terrain Reconnaissance and Mapping Methods in New York State. **Highway Research Board Bulletin - Special Publication** (Soil Mapping: Methods and Applications National Academy of Sciences / National Research Council), Washington, n. 299, p. 56-63, january 1961.

HOFFMANN, A.; VAN DER VEGT, J. W.; LEHMANN, F. Towards automated map updating: is it feasible with new digital data-acquisition and processing techniques? **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXIII, n. B2, p. 295-302, 2000.

HOWARD, A. Geomorphological systems – equilibrium and dynamics. **American Journal of Science**, v. 263, p. 302-312, 1965.

IBGE – **Aguaí** [material cartográfico]. Rio de Janeiro: IBGE, 1972. 1 mapa. (Carta do Brasil). Escala 1:50.000.

IBGE – **Caldas** [material cartográfico]. Rio de Janeiro: IBGE, 1972. 1 mapa. (Carta do Brasil). Escala 1:50.000.

IBGE – **Pinhal** [material cartográfico]. Rio de Janeiro: IBGE, 1972. 1 mapa. (Carta do Brasil). Escala 1:50.000.

IBGE – **Poços de Caldas** [material cartográfico]. Rio de Janeiro: IBGE, 1972. 1 mapa. (Carta do Brasil). Escala 1:50.000.

IBGE – **Santa Rita de Caldas** [material cartográfico]. Rio de Janeiro: IBGE, 1972. 1 mapa. (Carta do Brasil). Escala 1:50.000.

IBGE – **São João da Boa Vista** [material cartográfico]. Rio de Janeiro: IBGE, 1972. 1 mapa. (Carta do Brasil). Escala 1:50.000.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de geomorfologia**. Manuais técnicos em geociências. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 175 p.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. Escala 1:1 000 000. São Paulo: IPT, 1981.

IVANOV, V.V. & CHALOVA, Ye.P. An Experiment in Systematizing the Cartographic Images of Geomorphological Features. **Mapping Sciences and Remote Sensing**, v. 24, n. 4, october-december, 1987.

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

JOSHI, P. N.; MAURYA, D. M.; CHAMYAL, L. S. Morphotectonic segmentation and spatial variability of neotectonic activity along the Narmada–Son Fault, Western India: Remote sensing and GIS analysis. **Geomorphology**, v. 180-181, p. 292-306, 2013.

KLIMASZEWSKI, M. The principles of the geomorphological map of Poland. **Przegląd Geograficzny**, v. 28 (Suppl.), p. 32-40, 1956.

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

KLINGSEISEN, B.; METTERNICHT, G.; PAULUS, G. Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, n. 1, p. 109-121, 2008.

KNOTT, P. A.; DOORNKAMP, J. C.; JONES, R. H. The relationship between soils and geomorphological mapping units – a case study from Northamptonshire. **Bulletin of The International Association of Engineering Geologists**, Krefeld, n. 21, p. 186-193, 1980.

KOFFLER, N. Carta de declividade da bacia do rio Corumbataí para análise digital (SIG). **Geografia**, v.19, n. 2, p. 167-182, 1994.

KOFFLER, N. F. Uso das terras da bacia do rio Corumbataí em 1990. **Geografia**, Rio claro, v. 18, n. 1, p. 135-150, 1993.

KÖPPEN, W. **Climatología: con un estudio de los climas de la tierra**. México: Ed. Fondo de Cultura Económica. Versión de Pedro R. Hendrichs, 1948.

LANE, S.N., RICHARDS, K.S., CHANDLER, J.H. (Eds.). **Landform Monitoring, Modelling and Analysis**. Chichester: Wiley, 1998. 466 p.

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977.

LEONARDI, F. A. **A relação dos perfis lateríticos bauxíticos com as superfícies geomórficas do planalto de Poços de Caldas SP/MG**. 2007. 148 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

LIPORACI, S. R. **Mapeamento Geotécnico da Cidade e Parte do Município de Poços de Caldas-MG** - Escala 1:25.000, visando o Planejamento do Uso e Ocupação do Meio Físico. 1994. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1994.

LOLLO, J.A. **Mapeamento Geotécnico da Folha de Leme - SP**: utilização da geomorfologia para a caracterização preliminar de unidades geotécnicas. 1991. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991.

MACHADO, J. Beitrag zur Petrographie der suedwestlichen Grenze zwischen Mina Gerais und São Paulo. **Tschermak's Min. Und Petrog. Mitt.** [s.l.] v.9, p. 319-360. 1888.

MARK, D. M. Geomorphometric parameters: a review and evaluation. **Geographical Annals**, v. 57A, n. 1, p. 165-177, 1975.

MARK, D.; ARONSON, P. Scale-dependent fractal dimensions of topographic surfaces: An empirical investigation, with applications in geomorphology and computer mapping. **Journal of the International Association for Mathematical Geology**, v. 16, n. 7, p. 671-683, 1984.

MARTÍNEZ-ZAVALA, L.; LÓPEZ, A. J.; ANAYA ROMERO; GÓMEZ PARRALES, I.; BELLINFANTE CROCCI N.. Clasificación Automática de Elementos Geomorfológicos en La Cuenca del Río Tepalcatepec (México) A partir de un Modelo Digital de Elevaciones. **Cuaternario y Geomorfología**, v. 19, n. 3-4, p. 49-61, 2005.

MARTÍNEZ-ZAVALA, L.; LÓPEZ, A. J.; SANMIGUEL, P. I. Aplicación de un Sistema de Información Geográfica al Análisis del Medio Físico en el Parque Natural los Alcornocales. Aproximación a una Cartografía Geomorfológica a Partir de un Modelo Digital de Elevaciones. **Almoraima**, v. 35, p. 245-254, 2007.

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

MENDES, J. C. T. **Caracterização fitogeográfica como subsídio para a recuperação e a conservação da vegetação na Bacia do Rio Corumbataí/SP**. 2004. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Piracicaba, 2004.

MESCERJAKOV, J.P. Les concepts de morphostructure et de morphosculture: um nouvel instrument de l'analyse geomorphologique. **Annales de Geographie**, v. 77, n. 423, p. 538-552, 1968.

METTERNICHT, G.; KLINGSEISEN, B.; PAULUS, G. A semi-automated approach for GIS based generation of topographic attributes for landform classification. In: INTERNATIONAL CARTOGRAPHIC CONFERENCE, 22, 2005, La Coruña. **Proceedings...** La Coruña: The International Cartographic Association, 2005. p.1-10.

MILES, R. D. A concept of land forms, parent materials and soils in airphoto interpretation studies. In: SYMPOSIUM ON PHOTO INTERPRETATION, [s.n.], 1962, Delft. **Transactions of the...** Delft: International Society of Photogrammetry, 1962. p. 462-476.

MINÁR, J.; EVANS, I. S. Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. **Geomorphology**, v. 95, n. 3-4, p. 236–259, 2008.

MONBEIG, P. A divisão regional do estado de São Paulo. **Anuário da Associação de Geógrafos Brasileira**, v. 1, p. 19-30, 1949.

MORAES, F. T. **Zoneamento geoambiental do planalto de Poços de Caldas, MG/SP a partir de análise fisiográfica e pedoestratigráfica**. 2007. 173 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2007.

MORAES REGO, L. F. **Notas sobre a geomorfologia do estado de São Paulo e sua gênese**. São Paulo: Instituto Astronômico Geofísico. 1932. 43p.

MOREIRA, É. C., FERNANDES, L. A. D., PEREIRA, V. P. A Análise de Lineamentos Estruturais, Sob a Óptica da Geometria Fractal, no Maciço Alcalino de Poços de Caldas (MG). **Revista Pesquisas em Geociências**, v. 34, n 2, p. 89-97, 2007.

MORGAN, J. M.; LESH, A. M. Developing Landform Maps Using Esri's Modelbuilder. In: ESRI INTERNATIONAL USER CONFERENCE, 25, 2005, Redlands. **Proceedings...** Redlands: ESRI, 2005. p.1-11.

MORSE, S. P. A Mathematical Model for the Analysis of Contour-Line Data. **Journal of the Association for Computing Machinery**, v. 15, n. 2, p. 205-220, 1968. ISSN 0004-5411.

MOTOKI, A.; OLIVEIRA, J.L.S. Reconsiderações vulcanológicas sobre a hipótese de caldeira vulcânica no Complexo Alcalino de Poços de Caldas, MG. Parte I: rochas sedimentares como corpos capturados, fragmentados e afundados no magma fonolítico. In: SIMPÓSIO GEOLÓGICO MINAS GERAIS, 4, 1987, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: Núcleo Minas Gerais SBG, 1987. p. 420-433.

MOTOKI, A.; VARGAS, T.; CHIANELLO, E.; CORREA, F.J.G.; OLIVEIRA, J.L.S.; KLOTZ, M. Nível de denudação atual do complexo alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 35, Belém, **Anais...** Belem: SBG, 1988. p. 2633-2648.

MOTOKI, A. & VARGAS, T. Inexistência dos diques anelares no ressalto topográfico da borda perimétrica (muralha) do complexo alcalino de Poços de Caldas, MG-SP. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 2, São Paulo. **Boletim de Resumos...** São Paulo: SBG, 1991. p. 9.

MOURA, N.S.V.M.; DIAS, T.S. Elaboração do mapa geomorfológico do município de Porto Alegre - RS. **Ciência e Natura**, Edição especial, p. 219-233, 2012.

MUÑOZ, V. A. **Análise geomorfométrica de dados srtm aplicada ao estudo das relações solo-relevo**. 2009. 114 f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2009.

OLIVEIRA, S. L. **Tratado de Metodologia Científica**: projetos de pesquisa, TGI, TCC, monografias, dissertações e teses. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2002.

ONORATI, G.; POSCOLIERI, M.; VENTURA, R.; CHIARINI, V.; CRUCILLÀ, U. The Digital Elevation Model of Italy for Geomorphology and Structural Geology. **Catena**, v. 19, p. 147-178, 1992.

PAVLOPOULOS, K; EVELPIDOU, N.; VASSILOPOULOS, A. **Mapping geomorphological environments**. Berlin: Springer, 2009.

PEDRAZA, J. G.; PEÑA, J. L. M.; TELLO, B. R. La cartografía geomorfológica. In: GUTIÉRREZ, M. P., J.L. (Ed.). **Perspectivas en geomorfología**. Zaragoza: Sociedad Española de Geomorfología, v.2, 1988. p.189-206.

PENCK, W. **Morphological analysis of landforms: a contribution to physical geology**. London: Macmillian and Co.,. 1953. 429p.

PENTEADO, M.M. Implicações tectônicas na gênese das cuevas da Bacia de Rio Claro (SP). **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v.8, n. 15, p. 19-41, 1968.

PENTEADO, M.M. A bacia de sedimentação de Rio Claro - Estado de São Paulo. **Geographica**, Lisboa, v. 17, p. 38-61, 1969a.

PENTEADO, M.M. Novas informações a respeito dos pavimentos detríticos ("*stone lines*"). **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 9, n. 17, p. 15-41, 1969b.

PENTEADO, M. M. **Geomorfologia do Setor Centro-Ocidental da Depressão Periférica Paulista**. 1976. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Instituto de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1976.

PENTEADO-ORELLANA, M.M. Estudo geomorfológico do sítio urbano de Rio Claro (SP). **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 21, n. 42, p. 23-56, 1981.

PEUCKER, T. K.; DOUGLAS, D. H. Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data. **Computer Graphics and Image Processing**, New York, v. 4, n. 4, p. 375-387, dez. 1975.

PIKE, R. Web resources compiled for terrain modeling. **EOS, Transactions American Geophysical Union**, Washington - DC, v. 79, n. 17, p.208-208, 1998.

PIKE, R.J. **A bibliography of terrain modeling (geomorphometry), the quantitative representation of topography—supplement**. Open-File Report 02-465. Denver : U.S. Geological Survey, 2002. 116 p.

PIKE, R. J.; EVANS, I. S.; HENGL, T. Geomorphometry: A Brief Guide. In: HENGL, T. e REUTER, H. I. (Ed.). **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Amsterdam: Elsevier, v.33, 2009. Cap. 01, p.772.

PONÇANO, W. L. et. al. **Mapa Geomorfológico Preliminar do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1979. Escala 1:500.000.

PREFEITURA DE POÇOS DE CALDAS – SECRETARIA DE PLANEJAMENTO E COORDENAÇÃO. **Revisão do Plano Diretor do Município de Poços de Caldas – Diagnóstico Preliminar**. Levantamento de informações desenvolvido pela Exatus Planejamento e Coordenação. 2006. Disponível em: <http://www.camarapocos.mg.gov.br/downloads/plano_diretor/diagnostico/diagnostico_2006.pdf>. Acesso em: 25.10.2011.

REUTER, H. I.; HENGL, T.; GESSLER, P.; SOILLE, P. Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis. In: HENGL, T. e REUTER, H. I. (Ed.). **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Amsterdam: Elsevier, v.33, 2008. 772p.

REY, P. Photographie Ae´rienne et vegetation. In: TOULOUSE CONFERENCE ON AERIAL SURVEYS AND INTEGRATED STUDIES, [s.n.], 1968, Paris. **Proceedings...** Paris: UNESCO, 1968. p. 187-207.

ROBAINA, L. E. S.; TRENTIN, R., BAZZAN, T., RECKZIEGEL, E. W., DE NARDIN, D.; VERDUM, R. Compartimentação Geomorfológica da Bacia Hidrográfica do Ibicuí, Rio Grande do Sul, Brasil: Proposta de Classificação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.11, n.2, p. 11 – 23, 2010.

RODRIGUES, C. **Geomorfologia Aplicada: avaliação de experiências e de instrumentos de planejamento físico-territorial e ambiental brasileiros**. 1997. 279 f. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1997.

ROMSTAD, B. Improving Relief Classification with Contextual Merging. In: SCANDINAVIAN RESEARCH CONFERENCE ON GEOGRAPHICAL INFORMATION SCIENCE, 8, 2001, Norway. **Proceedings of ScanGIS'20**. Norway: GISS, 2001, p. 1-13.

ROSS, J. L. S. Relevo Brasileiro: uma nova proposta de classificação. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 4, p. 25-39, 1985.

ROSS, J. L. S. **Geomorfologia - Ambiente e Planejamento**. São Paulo: Contexto, 1990. 64p.

ROSS, J. L. S. O relevo brasileiro, as superfícies de aplanamento e os níveis morfológicos. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 5, p. 7-24, 1991.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 06, p. 17-29, 1992.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 8, p. 63-74, 1994.

ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Laboratório de Geomorfologia Depto de Geografia FFLCH-USP/Laboratório de Cartografia Geotécnica - Geologia Aplicada - IPT/FAPESP, 1997. 63p.

ROSS, J. L. S. **Suporte da geomorfologia aplicada: Os táxons e a cartografia do relevo**. Feira de Santana: UFES. [s.d.]. Disponível em: <http://www2.uefs.br/geotropicos/doc_02.pdf>. Acesso em: 01.02.2012.

SANTOS, L. J. C.; OKA-FIORI, C.; CANALLI, N, E.FIORI, A. P. SILVEIRA, C. T. SILVA, J. M. F.; ROSS, J. L. S. Mapeamento geomorfológico do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 2. p. 03-12, 2006

SCHMIDT, J.; ANDREW, R. Multi-scale landform characterization. **Area**, v. 37, p. 341-350, 2005.

SCHMIDT, J.; DIKAU, R. Extracting geomorphometric attributes and objects from digital elevation models: semantics, methods, future needs. In: DIKAU, R. e SAUBER, H. (Ed.). **GIS for Earth Surface Systems: Analysis and Modelling of the Natural Environment**. Berlim, German: Borntraeger, 1999. p.153-173.

SCHMIDT, J.; HEWITT, A. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. **Geoderma**, v. 24, n. 3-4, p. 243-256, 2004.

SCHNEIDER, R.L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R.A.; DAEMON, R.F.; NOGUEIRA, A.A. Revisão estratigráfica da bacia do Paraná. In: CONGRESSO

BRASILEIRO GEOLOGIA, 28., Porto Alegre, 1974. **Anais...** Porto Alegre: SBG, 1974. v.1, p. 41-65.

SCHORSCHER, H.D.; SHEA, M.E. The regional geology, mineralogy and geochemistry of the Poços de Caldas alkaline complex, Minas Gerais, Brazil. Poços de Caldas Report nº 1. In: NAGRA, SKB, UK DOE. **Poços de Caldas Project**. 1991.

SIMONOV, Yu.G. Engineering Geomorphology, Basic Tasks and Lines of Development. **Voprosy Geografii**, [s.v.], [s.p.], 1979.

SMITH, M. J.; CLARK, C. D. Methods for the visualisation of digital elevation models for landform mapping. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 30, p. 885-900, 2005.

SMITH, M.J., ROSE, J., BOOTH, S. Geomorphological mapping of glacial landforms from remotely sensed data: an evaluation of the principal data sources and an assessment of their quality. **Geomorphology**, v.76, p. 148-165, 2006.

SOARES, F. P. **Cartografia Morfológica de Detalhe e Intervenções Antrópicas no Alto Jacaré: Subsídios à Avaliação da Degradação Ambiental do Sistema Cantareira**. 2008. 112 f. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas. Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SOARES, P. C.; FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 16, n. 32, p. 71-104, 1976.

SOLNTSEV, N.A. Basic problems in Soviet landscape science. **Soviet Geography – Review and Translation**, v. 3, n. 6, p. 3-15, 1962.

SOTCHAVA, V. B. O. **O estudo de geossistemas**. São Paulo: USP, IGEOG, 1977. (Série Métodos em Questão, 16).

SPEIGHT, J. G. A parametric approach to landform regions. In: GEOGRAPHERS, I. O. B. (Ed.). **Progress in Geomorphology, Special Publication**. Oxford: Alden & Mowbray Ltd at the Alden Press, v.7, 1974. p.213-230.

SPEIGHT, J. G. Landform. In: MCDONALD, R. C.; ISBELL, R. F.; SPEIGHT, J. G.; WALKER, J.; HOP, M. S. (Ed.). **Australian Soil and Land Survey Field Handbook**. Melbourne: Inkata Press, 1990. p.9-57.

SPIRIDONOV, A.I.; PALIYENKO, E.T. & REVZON, A.L. Engineering Geomorphological Mapping. **Voprosy Geografii**, [s.l.], n. 93, [s.p.], 1979.

STEINKE, V. A.; SANO, E. E. Semi-automatic identification, GIS-based morphometry of geomorphic features of Federal District of Brazil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 1, p. 3-9, 2011.

ST-ONGE, D. A. Geomorphic Maps. In: FAIRBRIDGE, R. W. (Ed.). **The Encyclopedia of Geomorphology. Encyclopedia of Earth Sciences**. Nova York, USA: Reinhold Book Corporation, v.III, 1968. p.388 – 403.

TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 81-100, 1991.

TINÓS, T. M. **Mapeamento geológico-geotécnico a partir de metodologia de análise integrada: ensaio de aplicação no município de Poços de Caldas - MG**. 2011. 135 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

TORRES, F.T.P.; MARQUES NETO, R.; MENEZES, S.O. **Introdução à Geomorfologia**. São Paulo: Cengage, 2012. 322p.

TRICART, J. **Principes et méthodes de la géomorphologie**. Paris: Masson, 1965. 496p.

TROPPEMAIR, H.; MACHADO, M.L.A. Variação da estrutura da mata de galeria na Bacia do rio Corumbataí (SP) em relação à água do solo, tipo de margem e do traçado do rio. **Biogeografia**, n.8, p.1-28, 1974.

ULBRICH, H.H.G.J. **A petrografia, a estrutura e o quimismo de nefelina sienitos do Maciço Alcalino de Poços de Caldas, MG – SP**. 1984. Tese (Livre Docência) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.

VALENTE, R.O.A.; VETTORAZZI, C.A. Mapeamento do uso e cobertura do solo na bacia do rio Corumbataí, SP. **Circular Técnica IPEF**, Piracicaba, n.196, p.1-10, 2003.

VALERIANO, M. M. Mapeamento do comprimento de rampa em microbacias com sistemas de informação geográfica. **Acta Scientiarum** (UEM), v. 24, n. 5, p. 1541-1551, 2002.

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. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia - conceitos e tecnologias atuais**. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2008, Cap. 3, p. 72-104.

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

VALETON, I.; SCHUMANN, A.; VINX, R. WIENEKE, M. Supergene alteration since the upper Cretaceous on alkaline igneous and metasomatic rocks of the Poços de Caldas ring complex, Minas Gerais, Brazil. **Applied Geochemistry**, vol.12, p. 133-154, 1997.

VAN WESTEN, C. J. **Application of geographic information system to landslide hazard zonation**. Enschede, Netherlands: ITC Publication N° 15, 1993. 245p.

VAN ZUIDAM, R.A. Considerations on Systematic Medium-scale Geomorphological Mapping. **Zeitschrift für Geomorphologie**, Berlin - Stuttgart, v. 26, n. 4, p. 473-480, december 1982.

VASCONCELOS, V. et al. Sistema de classificação geomorfométrica baseado em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 2, p. 171-186, 2012.

VEDOVELLO, R. **Zoneamento geotécnicos por sensoriamento remoto, para estudos de planejamento do meio físico - aplicação em expansão urbana**.1993. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1993.

VENTURA, S. J.; IRVIN, B. J. Automated landform classification methods for soil-landscape studies. In: WILSON, J. P. e GALLANT, J. C. (Ed.). **Terrain analysis: Principles and applications**. New York, USA: John Wiley & Sons, 2000. p.267-294.

VERHAGEN, P.; DRĂGUT, L. Object-based landform delineation and classification from DEMs for archaeological predictive mapping. **Journal of Archaeological Science**, v. 39, n. 3, p. 698-703, 2012.

VERSTAPPEN, H.Th. **Applied geomorphology: Geomorphological surveys for environmental development**. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1983. 437p.

VERSTAPPEN, H.Th. Old and New Trends in Geomorphological and Landform Mapping. In: SMITH, M. J.; PARON, P.; GRIFFITHS, J. S. (Eds.) **Geomorphological Mapping Methods and Applications**. Reino Unido: Elsevier, 2011. Cap. 2, p. 13-35.

VERSTAPPEN, H.Th.; VAN ZUIDAM, R. A. **ITC Textbook of Photo-interpretation**. Vol. VII. Delft: International Institute of Aerial Survey and Earth Sciences, 1968.

VINK, A.P.A. Landscape Ecological Mapping. **ITC Journal**, Amsterdam, n. 3, p. 338-343, 1982.

WESSMANN,R.; VLEK, P. **Tropical agriculture in transition – opportunities for mitigating greenhouse gas emissions?** Berlim: Springer-Science + Business Media, 2004.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. **Terrain Analysis: Principles and Applications**. New York, USA: Wiley, 2000.

WISE D. U., FUNICIELLO R., PAROTTO M., SALVINI F. Topographic lineament swarms: clues to their origin from domain analysis of Italy. **Geological Society of America Bulletin**, v. 96, p. 952–967, 1985.

WOOD, J. **The geomorphological characterisation of digital elevation models**. 1996. Tese (Doutor em Filosofia). Department of Geography, University of Leicester, Leicester, UK, 1996.

WOOLDRIDGE, S. W. The cycle of erosion and the representation of relief. **Scottish Geographical Magazine**, n. 48, p. 6-30, 1932.

ZAINE, J. E. **Método de fotogeologia aplicado a estudos geológico-geotécnicos: ensaio em Poços de Caldas, MG**. 2011. 97 f. Tese (Livre – docência) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

ZAINE, J.E. **Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo: ensaios de aplicação na área urbana do Município de Rio Claro (SP)**. 2000. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

ZAINE, J. E. **Geologia da Formação Rio Claro na Folha de Rio Claro (SP)**. 1994. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 1994.

ZAINE, M. F.; ZAINE, J. E. Patrimônios Naturais de Rio Claro (SP) e Região. In: SARTI, A. C.; MUNDET I CERDAN, L. **Turismo e arqueologia: múltiplos olhares**. Piracicaba: Equilíbrio Ed., 2009. p. 215-260.

APÊNDICE A

ALGORÍTMO DA FERRAMENTA DE CLASSIFICAÇÃO DAS FORMAS DO RELEVO

```
# Import arcpy module
import arcpy
from arcpy.sa import *
import arcgisscripting, sys, os, string, math

# Check out any necessary licenses
arcpy.CheckOutExtension("spatial")

# Set Geoprocessing environments
arcpy.env.overwriteOutput = True

# Script arguments
WorkFolder= arcpy.GetParameterAsText(0)
##As amostras devem ter o campo Classe_Ref
(tipo texto) com as classes que serão validadas
##Classes que serão validadas: Terrenos
planos; Morros baixos; Morros altos; Montanhas;
Colinas
##As classes de Tabuleiros podem ser
validadas dependendo da seleção de
reclassificação selecionada
Samples= arcpy.GetParameterAsText(1)
opClassifica= int(arcpy.GetParameterAsText(2))
#1 Sem Tabuleiro e 2 com os tabuleiros

def kappa (fc_conc, Field1, Field2, Field3):
    # Created by: Zack Reams
    # Created on: 2/3/2010
    # Purpose: Runs through a table to calculate
    the Kappa Coefficient.
    # The results of the table are outputted as a
    .csv file so the results can be used in Excel.
    # Files Necessary to Run: Input Table, and
    two Fieldnames (AA field and map field),
    (Optional) You can provide the class
    descriptions and it will print them alongside the
    table.
    gp = arcgisscripting.create()
    #fc_conc = sys.argv[1]
    Total_obs = gp.GetCount(fc_conc)
    x = 0
    y = 0

    Field3_opt = False
    #Field1 = sys.argv[2]
    #Field2 = sys.argv[3]
    #Field3 = sys.argv[4]
    if Field3 <> "#":
        Field3_opt = True

    Obs1 = []
```

```
Obs2 = []
class_temp = ""
Classifier = []
class_desc = []

curs = gp.SearchCursor(fc_conc)
fld = curs.Next()

# Get values and find unique values.
while fld:
    Obs1.append(str(fld.GetValue(Field1)))
    Obs2.append(str(fld.GetValue(Field2)))
    try:
        if not str(fld.GetValue(Field1)) in
Classifier:
Classifier.append(str(fld.GetValue(Field1)))

class_desc.append(str(fld.GetValue(Field3)))
        if not str(fld.GetValue(Field2)) in
Classifier:
Classifier.append(str(fld.GetValue(Field2)))

class_desc.append(str(fld.GetValue(Field3)))
    except:
        "There was a problem"

    fld = curs.Next()

TC = len(Classifier)
# Create a matrix classifier, adding a
row/column for the labels, and one for the totals.
Labels = TC + 2
matrixi = [[0 for col in range(Labels)] for row in
range(Labels)]
matrixi[0][0] = "#"
matrixi[0][Labels-1] = Field2
matrixi[Labels-1][0] = Field1
matrixi[Labels-1][Labels-1] = Total_obs
while x < TC:
    matrixi[x+1][0] = Classifier[x]
    matrixi[0][x+1] = Classifier[x]
    x += 1

x = 0
for obs in range(Total_obs):
    Obs_temp1 = Obs1[obs]
    Obs_temp2 = Obs2[obs]
    for col in range(TC):
        for row in range(TC):
```



```

        col_temp = matrixi[col-col][row+1]
        row_temp = matrixi[col+1][row-row]
        if ((col_temp == Obs2[obs]) and
(row_temp == Obs1[obs])):
            matrixi[col+1][row+1] += 1
            matrixi[Labels-1][row+1] += 1
            matrixi[col+1][Labels-1] += 1

# Find the chance agreement
Chance_agree = 0.0
chance1 = 0.00
chance2 = 0.00
per_chance = ""
per_chance2 = ""
for row in range(TC):
    chance1 = float(matrixi[Labels-
1][row+1])/float(matrixi[Labels-1][Labels-1])

    per_chance = " (" +
str(round(chance1*100,1)) + "%)"

    matrixi[Labels-1][row+1] =
str(matrixi[Labels-1][row+1]) + str(per_chance)

    chance2 = float(matrixi[row+1][Labels-
1])/float(matrixi[Labels-1][Labels-1])

    per_chance2 = " (" +
str(round(chance2*100,1)) + "%)"

    matrixi[row+1][Labels-1] =
str(matrixi[row+1][Labels-1]) + str(per_chance2)

    chance_temp = chance1*chance2

    Chance_agree += chance_temp

# Find the observed agreement
Observed_total = 0.0
for i in range(TC):
    Observed_total += matrixi[i+1][i+1]
Observed_agreement =
(Observed_total/Total_obs)

# Find the Kappa Coefficient
Kappa_coef = ((Observed_agreement -
Chance_agree)/(1 - Chance_agree))

# Write to file with results and table.
outFile = open(fc_conc + ".txt", "w")
for col in range(Labels):
    if col > 0:
        outFile.write("\n")
    for row in range(Labels):
        outFile.write(str(matrixi[col][row]))
        if row <> Labels-1:

```

```

        outFile.write(",")
    if Field3_opt == True:
        if row == Labels-1 and col-1 < TC-1:
            outFile.write(",," + Classifier[col] +
", " + class_desc[col])
        outFile.write("\n\n\n")
        outFile.write("Observed Agreement: " +
str(round(Observed_agreement*100, 2)) +
"%\n")
        outFile.write("Chance Agreement: " +
str(round(Chance_agree*100, 2)) + "%\n")
        outFile.write("Kappa Coefficient: " +
str(round(Kappa_coef*100, 2)) + "%\n")
        outFile.close()

def concordancia (arq, calcList):
    f=open(arq, 'r')
    s=f.read(-1)
    f.closed
    l=s.split("\n")

    l.pop()
    l.pop()
    l.pop()
    l.pop()
    l.pop()
    l.pop()
    l.pop(0)

    l_length=len(l)

#pegar totais
totS=l[l_length-1].split(",")
totS.pop(0)
totS.pop(len(totS)-1)
totOK=[]
for t in totS:
    totOK.append(float(t.split("(")[0]))
c=0
for e in l:
    c+=1
    if c==l_length:
        break
    e_l1=e.split("(")
    e_l2=e_l1[0].split(",")
    if e_l2[0]!=" ":
        c_list=[]
        c_list.append(e_l2[0])
        acerto=float(e_l2[c])

#Caso os acertos sejam igual a zero
if acerto==0:
    c_list.append(acerto)
    c_list.append(acerto)
    c_list.append(acerto)
    #Acurácia do usuário

```

```

else:
    acu=acerto/float(e_l2[len(e_l2)-1])
    c_list.append(acu)
    #Acurácia do produtor
    acp=acerto/totOK[c-1]
    c_list.append(acp)
    #Mínimo acu e acp
    if acu>=acp:
        minimo=acp
    else:
        minimo=acu
    c_list.append(minimo)
    calcList.append(c_list)

def Dikau (MDE, psize):
    deleteFiles=[]
    Janela = NbrRectangle(psize, psize, "CELL")
    # Process: Reclassify (2)
    Map1="Map1"
    deleteFiles.append(Map1)
    remap = RemapRange([[-100, 0, 0],[0, 5000,
1]])
    outReclass = Reclassify(MDE, "VALUE",
remap, "NODATA")
    outReclass.save(Map1)

    # Process: Slope
    Map4="Map4"
    deleteFiles.append(Map4)
    outSlope = Slope(MDE, "PERCENT_RISE",
"1")
    outSlope.save(Map4)
    #arcpy.gp.Slope_sa(MDE, Map4,
"PERCENT_RISE", "1")

    # Process: Reclassify
    Map5="Map5"
    deleteFiles.append(Map5)
    remap = RemapRange([[0, 8, 1],[8, 5000, 0]])
    outReclass = Reclassify(Map4, "Value",
remap, "NODATA")
    outReclass.save(Map5)
    #arcpy.gp.Reclassify_sa(Map4, "Value", "0 8
1;8 5000 0", Map5, "NODATA")

    # Process: Focal Statistics
    Map6="Map6"
    deleteFiles.append(Map6)
    outFocalStatistics = FocalStatistics(Map5,
Janela, "SUM", "DATA")
    outFocalStatistics.save("Map6")
    #arcpy.gp.FocalStatistics_sa(Map5, Map6,
Janela, "SUM", "DATA")

    # Process: Get Raster Properties (2)

```

```

Map6_minumun=float(arcpy.GetRasterPropertie
s_management(Map6, "MINIMUM",
"" ).getOutput(0))

```

```

# Process: Get Raster Properties (3)

```

```

Map6_maximum=float(arcpy.GetRasterPropertie
s_management(Map6, "MAXIMUM",
"" ).getOutput(0))

```

```

# Process: Raster Calculator (18)

```

```

Map7="Map7"
deleteFiles.append(Map7)
outRaster = (0 + Float(Map6) -
Map6_minumun) * ((100 - 0)/(Map6_maximum -
Map6_minumun))
outRaster.save(Map7)

```

```

#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("float(%MinN%)+
(Float('\%Map6%\') - float(%Min%)) *
(float(%MaxN%)-float(%MinN%))/(float(%Max%
- float(%Min%))", Map7)

```

```

# Process: Reclassify (3)
Map8_Slope="SlopePar"
remap = RemapRange([[0, 20, 100],[20, 50,
200],[50, 80, 300], [80, 100, 400]])
outReclass = Reclassify(Map7, "Value",
remap, "NODATA")
outReclass.save(Map8_Slope)
#arcpy.gp.Reclassify_sa(Map7, "Value", "0 20
100;20 50 200;50 80 300;80 100 400", Map8_
_Slope_Parameter, "NODATA")

```

```

# Process: Focal Statistics (3)
Map9="Map9"
deleteFiles.append(Map9)
outFocalStatistics = FocalStatistics(MDE,
Janela, "MAXIMUM", "DATA")
outFocalStatistics.save(Map9)
#arcpy.gp.FocalStatistics_sa(MDE, Map9,
Janela, "MAXIMUM", "DATA")

```

```

# Process: Focal Statistics (4)
Map10="Map10"
deleteFiles.append(Map10)
outFocalStatistics = FocalStatistics(MDE,
Janela, "MINIMUM", "DATA")
outFocalStatistics.save(Map10)
#arcpy.gp.FocalStatistics_sa(MDE, Map10,
Janela, "MINIMUM", "DATA")

```

```

# Process: Raster Calculator (3)
Map11="Map11"

```

```

deleteFiles.append(Map11)
outRaster=Raster(Map9) - Raster(Map10)
outRaster.save(Map11)
#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\'%Map9%\'' -
\'%Map10%\''", Map11)

```

```

# Process: Reclassify (4)
Map12_Relief="ReliefPar"
remap = RemapRange([[0, 30, 10],[30, 90,
20],[90, 150, 30], [150, 300, 40],[300, 900,
50],[900, 99999, 60]])
outReclass = Reclassify(Map11, "Value",
remap, "NODATA")
outReclass.save(Map12_Relief)
#arcpy.gp.Reclassify_sa(Map11, "Value", "0
30 10;30 90 20;90 150 30;150 300 40;300 900
50;900 99999 60", Map12_-_Relief_Parameter,
"NODATA")

```

```

# Process: Raster Calculator (15)
Map32="Map32"
deleteFiles.append(Map32)
outRaster=Raster(Map8_Slope) +
Raster(Map12_Relief)
outRaster.save(Map32)
#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\'%Map8 -
Slope Parameter%\'' + \'%Map12 - Relief
Parameter%\''", Map32)

```

```

# Process: Raster Calculator (4)
Map13="Map13"
deleteFiles.append(Map13)
outRaster=Raster(Map11) / 2
outRaster.save(Map13)

```

```

#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\'%Map11%\''/2"
, Map13)

```

```

# Process: Raster Calculator (5)
Map14="Map14"
deleteFiles.append(Map14)
outRaster=Raster(Map10) + Raster(Map13)
outRaster.save(Map14)
#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\'%Map10%\''
+ \'%Map13%\''", Map14)

```

```

# Process: Raster Calculator (6)
Map15="Map15"
deleteFiles.append(Map15)
outRaster=Raster(Map14) - Raster(MDE)
outRaster.save(Map15)
#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\'%Map14%\''
- \'%MDE%\''", Map15)

```

```

# Process: Reclassify (5)
Map16="Map16"

```

```

deleteFiles.append(Map16)
remap = RemapRange([[ -9999, 0, 2],[0, 9999,
1]])
outReclass = Reclassify(Map15, "Value",
remap, "NODATA")
outReclass.save(Map16)
#arcpy.gp.Reclassify_sa(Map15, "Value", "-
9999 0 2;0 9999 1", Map16, "NODATA")

```

```

# Process: Reclassify (6)
Map17_Lowlands="Map17_Lowlands"
deleteFiles.append(Map17_Lowlands)
remap = RemapValue([[1, 1],[2, 0]])
outReclass = Reclassify(Map16, "Value",
remap, "NODATA")
outReclass.save(Map17_Lowlands)
#arcpy.gp.Reclassify_sa(Map16, "VALUE", "1
1;2 0", Map_17_-_Lowlands_Map, "NODATA")

```

```

# Process: Raster Calculator (7)
Map18="Map18"
deleteFiles.append(Map18)
outRaster=Raster(Map5) *
Raster(Map17_Lowlands)
outRaster.save(Map18)
#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\'%Map5%\''
* \'%Map 17 - Lowlands Map%\''", Map18)

```

```

# Process: Focal Statistics (5)
Map19="Map19"
deleteFiles.append(Map19)
outFocalStatistics = FocalStatistics(Map18,
Janela, "SUM", "DATA")
outFocalStatistics.save(Map19)
#arcpy.gp.FocalStatistics_sa(Map18, Map19,
Janela, "SUM", "DATA")

```

```

# Process: Raster Calculator (8)
Map20="Map20"
deleteFiles.append(Map20)
outRaster=Float(Map6)
outRaster.save(Map20)

```

```

#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("Float(\'%Map6
%\')", Map20)

```

```

# Process: Raster Calculator (9)
Map21="Map21"
deleteFiles.append(Map21)
outRaster=Raster(Map19) / Raster(Map20)
outRaster.save(Map21)
#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\'%Map19%\''
/ \'%Map20%\''", Map21)

```

```

# Process: Raster Calculator (2)
Map21B="Map21B"

```

```

deleteFiles.append(Map21B)
outRaster=Con(IsNull(Raster(Map21)), 0,
Raster(Map21))
outRaster.save(Map21B)

#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("Con(IsNull(\"%
Map21%\"),0,\"%Map21%\")", Map21B)

# Process: Raster Calculator (10)
Map22="Map22"
deleteFiles.append(Map22)
outRaster=Raster(Map17_Lowlands) *
Raster(Map21B)
outRaster.save(Map22)
#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\"%Map 17 -
Lowlands Map%\" * \"%Map21B%\"", Map22)

# Process: Reclassify (7)
Map23="Map23"
deleteFiles.append(Map23)
remap = RemapRange([[0, 0, 0],[0, 0.75,
2],[0.75, 1, 1]])
outReclass = Reclassify(Map22, "Value",
remap, "NODATA")
outReclass.save(Map23)
#arcpy.gp.Reclassify_sa(Map22, "Value", "0
0;0 0.75 2;0.75 1 1", Map23_
_gentle_slopes_in_lowlands, "NODATA")

# Process: Raster Calculator (21)
Map23B="Map23B"
deleteFiles.append(Map23B)
outRaster=Raster(Map23) +
Raster(Map17_Lowlands)
outRaster.save(Map23B)
#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\"%Map23 -
gentle slopes in lowlands%\" + \"%Map 17 -
Lowlands Map%\"", Map23B)

# Process: Reclassify (13)
Map23C="Map23C"
deleteFiles.append(Map23C)
remap = RemapValue([[0, 0],[1, 1],[2, 1],[3,
2]])
outReclass = Reclassify(Map23B, "Value",
remap, "NODATA")
outReclass.save(Map23C)
#arcpy.gp.Reclassify_sa(Map23B, "Value", "0
0;1 1;2 1;3 2", Map23C, "NODATA")

# Process: Reclassify (8)
Map24="Map24"
deleteFiles.append(Map24)
remap = RemapValue([[1, 0],[2, 1]])
outReclass = Reclassify(Map16, "Value",
remap, "NODATA")

```

```

outReclass.save(Map24)
#arcpy.gp.Reclassify_sa(Map16, "VALUE", "1
0;2 1", Map24_-_Uplands_Map, "NODATA")

# Process: Raster Calculator (11)
Map25="Map25"
deleteFiles.append(Map25)
outRaster=Raster(Map5) * Raster(Map24)
outRaster.save(Map25)
#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\"%Map5%\"
* \"%Map24 - Uplands Map%\"", Map25)

# Process: Focal Statistics (6)
Map26="Map26"
deleteFiles.append(Map26)
outFocalStatistics = FocalStatistics(Map25,
Janela, "SUM", "DATA")
outFocalStatistics.save(Map26)
#arcpy.gp.FocalStatistics_sa(Map25, Map26,
Janela, "SUM", "DATA")

# Process: Raster Calculator (12)
Map27="Map27"
deleteFiles.append(Map27)
outRaster=Raster(Map26) / Raster(Map20)
outRaster.save(Map27)
#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\"%Map26%\"
/ \"%Map20%\"", Map27)

# Process: Raster Calculator (19)
Map27B="Map27B"
deleteFiles.append(Map27B)
outRaster=Con(IsNull(Raster(Map27)), 0,
Raster(Map27))
outRaster.save(Map27B)

#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("Con(IsNull(\"%
Map27%\"),0,\"%Map27%\")", Map27B)

# Process: Raster Calculator (13)
Map28="Map28"
deleteFiles.append(Map28)
outRaster=Raster(Map24) * Raster(Map27B)
outRaster.save(Map28)
#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\"%Map24 -
Uplands Map%\" * \"%Map27B%\"", Map28)

# Process: Reclassify (9)
Map29="Map29"
deleteFiles.append(Map29)
remap = RemapRange([[0, 0, 0],[0, 0.75, 3],
[0.75, 1, 4]])
outReclass = Reclassify(Map28, "Value",
remap, "NODATA")
outReclass.save(Map29)

```

```
#arcpy.gp.Reclassify_sa(Map28, "Value", "0
0;0 0.75 3;0.75 1 4", Map29_
_gentle_slopes_in_uplands, "NODATA")
```

```
# Process: Raster Calculator (20)
Map29B="Map29B"
deleteFiles.append(Map29B)
outRaster=Raster(Map29) + Raster(Map24)
outRaster.save(Map29B)
#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\'%Map29 -
gentle slopes in uplands%\'' + \''Map24 -
Uplands Map%\''", Map29B)
```

```
# Process: Reclassify (12)
Map29C="Map29C"
deleteFiles.append(Map29C)
remap = RemapValue([[0, 0],[1, 3], [4, 3],[5,
4]])
outReclass = Reclassify(Map29B, "Value",
remap, "NODATA")
outReclass.save(Map29C)
#arcpy.gp.Reclassify_sa(Map29B, "Value", "0
0;1 3;4 3;5 4", Map29C, "DATA")
```

```
# Process: Raster Calculator (14)
Map30="ProfilePar"
outRaster=Raster(Map23C) +
Raster(Map29C)
outRaster.save(Map30)
```

```
#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\'%Map23C%\''
+ \''Map29C%\''", Map_30_
_profile_parameter)
```

```
# Process: Raster Calculator (16)
Map33="Map33"
deleteFiles.append(Map33)
outRaster=Raster(Map32) + Raster(Map30)
outRaster.save(Map33)
#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\'%Map32%\''
+ \''Map 30 - profile parameter%\''", Map33_
_Hammond_terrain_type_code)
```

```
# Process: Reclassify (11)
Map34="Map34"
deleteFiles.append(Map34)
remap =
RemapRange([[111,114,51],[121,124,52],[131,1
34,53],[141,144,54],[151,154,55],[161,164,56],[2
11,214,41],[221,224,42],[231,234,43],[241,244,4
4],[251,254,45],[261,264,46],[311,321,13],[321,3
24,14],[331,332,31],[333,334,21],[341,342,32],[3
43,344,22],[351,352,33],[353,354,23],[361,362,3
4],[363,364,24],[411,414,11],[421,424,12],[431,4
32,31],[433,434,21],[441,442,32],[443,444,22],[4
```

```
51,452,33],[453,454,23],[461,462,34],[463,464,2
4]])
```

```
outReclass = Reclassify(Map33, "Value",
remap, "NODATA")
outReclass.save(Map34)
#arcpy.gp.Reclassify_sa(Map33_
_Hammond_terrain_type_code, "Value", "111
114 51;121 124 52;131 134 53;141 144 54;151
154 55;161 164 56;211 214 41;221 224 42;231
234 43;241 244 44;251 254 45;261 264 46;311
321 13;321 324 14;331 332 31;333 334 21;341
342 32;343 344 22;351 352 33;353 354 23;361
362 34;363 364 24;411 414 11;421 424 12;431
432 31;433 434 21;441 442 32;443 444 22;451
452 33;453 454 23;461 462 34;463 464 24",
Map34_ - Dikau_landform_code_map,
"NODATA")
```

```
# Process: Majority Filter
Map35="Map35"
deleteFiles.append(Map35)
outMajFilt = MajorityFilter(Map34, "EIGHT",
"MAJORITY")
outMajFilt.save(Map35)
```

```
# Process: Region Group
Map35B="Map35B"
deleteFiles.append(Map35B)
outRegionGrp = RegionGroup(Map35,
"EIGHT", "WITHIN", "ADD_LINK", "")
outRegionGrp.save(Map35B)
#arcpy.gp.RegionGroup_sa(Map35, Map35B,
"EIGHT", "WITHIN", "ADD_LINK", "")
```

```
# Process: Set Null
Map35C="Map35C"
deleteFiles.append(Map35C)
outSetNull = SetNull(Map35B, 1, "Count <9")
outSetNull.save(Map35C)
```

```
# Process: Nibble
Map35D="Map35D"
deleteFiles.append(Map35D)
nibbleOut = Nibble(Map35, Map35C,
"ALL_VALUES")
nibbleOut.save(Map35D)
#arcpy.gp.Nibble_sa(Map35, Map35C,
Map35D, "ALL_VALUES")
```

```
# Process: Raster Calculator (17)
Map36="DikauMap"
outRaster=Raster(Map1) * Raster(Map35D)
outRaster.save(Map36)
#arcpy.gp.RasterCalculator_sa("\'%Map1%\''
* \''Map35D%\''", Map36)
```

```

# Process: Add Field
arcpy.AddField_management(Map36,
"Class_Dikau", "TEXT", "", "", "50", "",
"NULLABLE", "NON_REQUIRED", "")

# Process: Calculate Field
arcpy.CalculateField_management(Map36,
"Class_Dikau", "dikau", "VB", "Dim dikau\\nlf
[Value] = 11 Then\\ndikau = \\\"Terrenos planos
ou quase planos\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 12
Then\\ndikau = \\\"Terrenos planos suavizados
com algum relevo local\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 13
Then\\ndikau = \\\"Terrenos planos irregulares
com relevo baixo\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 14
Then\\ndikau = \\\"Terrenos planos irregulares
com relevo moderado\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 21
Then\\ndikau = \\\"Tabuleiro com relevo
moderado\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 22 Then\\ndikau
= \\\"Tabuleiro com relevo
considerável\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 23
Then\\ndikau = \\\"Tabuleiro com relevo
alto\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 24 Then\\ndikau =
\\\"Tabuleiro com relevo muito alto\\\"\\n\\n\\nelseif
[Value] = 31 Then\\ndikau = \\\"Terrenos planos
com colinas\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 32
Then\\ndikau = \\\"Terrenos planos com
morros\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 33 Then\\ndikau =
\\\"Terrenos planos com montanhas
baixas\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 34 Then\\ndikau =
\\\"Terrenos planos com montanhas
altas\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 41 Then\\ndikau =
\\\"Colinas baixas suavizadas\\\"\\n\\n\\nelseif [Value]
= 42 Then\\ndikau = \\\"Colinas altas
suavizadas\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 43
Then\\ndikau = \\\"Morros baixos
suavizados\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 44
Then\\ndikau = \\\"Morros altos
suavizados\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 45
Then\\ndikau = \\\"Montanhas baixas
suavizadas\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 46
Then\\ndikau = \\\"Montanhas altas
suavizadas\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 51
Then\\ndikau = \\\"Colinas baixas\\\"\\n\\n\\nelseif
[Value] = 52 Then\\ndikau = \\\"Colinas
altas\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 53 Then\\ndikau =
\\\"Morros baixos\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 54
Then\\ndikau = \\\"Morros altos\\\"\\n\\n\\nelseif [Value]
= 55 Then\\ndikau = \\\"Montanhas
baixas\\\"\\n\\n\\nelseif [Value] = 56 Then\\ndikau =
\\\"Montanhas altas\\\"\\n\\n\\nelse\\ndikau =
\\\"ERRO!!!!\\\"\\nend if")

# Process: Raster to Polygon
Map37="DikauMap_pol"

```

```

arcpy.RasterToPolygon_conversion(Map36,
Map37, "NO_SIMPLIFY", "Class_Dikau")
arcpy.AddField_management(Map37,
"Class_R", "TEXT", "", "", "50", "", "NULLABLE",
"NON_REQUIRED", "")

def DikauAvalia (Map37):
    if opClassifica==1:
        ## Opção 1 - Sem considerar os Tabuleiros
        #Reclass Class Dikau classificando
        Tabuleiro como "Terrenos planos"
        rows=arcpy.UpdateCursor (Map37)
        for row in rows:
            cd=row.getValue("Class_Dikau")
            if cd=="Terrenos planos ou quase
planos" or cd=="Terrenos planos suavizados
com algum relevo local" or cd=="Terrenos
planos suavizados com algum relevo local" or
cd=="Terrenos planos irregulares com relevo
baixo" or cd=="Terrenos planos irregulares com
relevo moderado" or cd=="Tabuleiro com relevo
considerável" or cd=="Tabuleiro com relevo
moderado" or cd=="Tabuleiro com relevo alto" or
cd=="Tabuleiro com relevo muito alto" or
cd=="Terrenos planos com colinas" or
cd=="Terrenos planos com morros" or
cd=="Terrenos planos com montanhas baixas" or
cd=="Terrenos planos com montanhas altas":
                row.setValue("Class_R", "Terrenos
planos")
            if cd=="Colinas baixas suavizadas" or
cd=="Colinas altas suavizadas" or cd=="Colinas
altas" or cd=="Colinas baixas":
                row.setValue("Class_R", "Colinas")
            if cd=="Morros baixos suavizados" or
cd=="Morros baixos":
                row.setValue("Class_R", "Morros
baixos")
            if cd=="Morros altos suavizados" or
cd=="Morros altos":
                row.setValue ("Class_R", "Morros
altos")
            if cd=="Montanhas baixas suavizadas" or
cd=="Montanhas altas suavizadas" or
cd=="Montanhas altas" or cd=="Montanhas
baixas":
                row.setValue ("Class_R",
"Montanhas")
            if cd=="ERRO!!!!":
                row.setValue ("Class_R", "ERRO!!!")
            rows.updateRow(row)
        try:
            del rows, row
        except:
            pass

```



```

## Opção 2 - considerando os Tabuleiros
#Reclass Class Dikau classificando Tabuleiro
como "Tabuleiro"
if opClassifica==2:
    rows=arcpy.UpdateCursor (Map37)
    for row in rows:
        cd=row.getValue("Class_Dikau")
        if cd=="Terrenos planos ou quase
planos" or cd=="Terrenos planos suavizados
com algum relevo local" or cd=="Terrenos
planos suavizados com algum relevo local" or
cd=="Terrenos planos irregulares com relevo
baixo" or cd=="Terrenos planos irregulares com
relevo moderado":
            row.setValue("Class_R", "Terrenos
planos")
            if cd=="Tabuleiro com relevo
considerável" or cd=="Tabuleiro com relevo
moderado" or cd=="Tabuleiro com relevo alto" or
cd=="Tabuleiro com relevo muito alto" or
cd=="Terrenos planos com colinas" or
cd=="Terrenos planos com morros" or
cd=="Terrenos planos com montanhas baixas"
or cd=="Terrenos planos com montanhas altas":
                row.setValue("Class_R", "Tabuleiros")
                if cd=="Colinas baixas suavizadas" or
cd=="Colinas altas suavizadas" or cd=="Colinas
altas" or cd=="Colinas baixas":
                    row.setValue("Class_R", "Colinas")
                    if cd=="Morros baixos suavizados" or
cd=="Morros baixos":
                        row.setValue("Class_R", "Morros
baixos")
                        if cd=="Morros altos suavizados" or
cd=="Morros altos":
                            row.setValue ("Class_R", "Morros
altos")
                            if cd=="Montanhas baixas suavizadas" or
cd=="Montanhas altas suavizadas" or
cd=="Montanhas altas" or cd=="Montanhas
baixas":
                                row.setValue ("Class_R",
"Montanhas")
                                if cd=="ERRO!!!!":
                                    row.setValue ("Class_R", "ERRO!!!!")
                                    rows.updateRow(row)
                                try:
                                    del rows, row
                                except:
                                    pass

#Configurar e executar Kappa
Valida=WorkFolder+"\\Valida_%d.shp"%w
arcpy.Intersect_analysis([Samples, Map37],
Valida)
kappa (Valida, "Classe_Ref", "Class_R", "#")

```

```

acertosClasses=[]
concordancia (Valida+".txt",acertosClasses)

acertosJanelas.append("Janela_%dX%d"%(w,w
))
    acertosJanelas.append(acertosClasses)
    print(acertosJanelas)
    #Delete Temp Files
    try:
        for fc in deleteFiles:
            arcpy.Delete_management(fc)
    except:
        pass

##Executa a classificação Dikau para todas as
janelas
acertosJanelas=[]
nJanela=0
for w in range (minWindow, maxWindow+1,
step):
    nJanela+=1
    bd_name="Model_%dX%d" %(w,w)
    arcpy.CreateFileGDB_management
(WorkFolder, bd_name, "CURRENT")
    arcpy.env.workspace =
WorkFolder+"\\ "+bd_name+".gdb"
    print ("Processando Janela %dX%d"%(w,w))
    Dikau (MDE, w)

##Avalia cada Janela
acertosJanelas=[]
nJanela=0
arcpy.env.workspace = WorkFolder
workspaces = arcpy.ListWorkspaces("*",
"FileGDB")
for WF in workspaces:
    arcpy.env.workspace = WF
    print(WF)
    Maps=arcpy.ListFeatureClasses()
    WF_list=WF.split("\\")
    bd_name=WF_list[len(WF_list)-1]
    bd_name=bd_name.split(".")[0]
    w=int(bd_name.split("X")[1])
    print(w)
    DikauAvalia(Maps[0])
AvaliaClasses=[]

#Escreve arquivo txt AvaliaGeral formatado
AvaliaFile = open(WorkFolder+"\\AvaliaGeral" +
".txt", "w")
AvaliaFile.write("Dados Gerais")
for W in acertosJanelas:
    if isinstance (W,str)==True:
        print (len(list(W)))
        if len(list(W))==12:
            w1=W.split("_")

```

```

w1_1=w1[1].split("X")

W=w1[0]+"_"+"0"+w1_1[0]+"X"+"0"+w1_1[0]
if len(list(W))==10:
    w1=W.split("_")
    w1_1=w1[1].split("X")

W=w1[0]+"_"+"00"+w1_1[0]+"X"+"00"+w1_1[0]
modelo=W.split("_")[1]

else:
    for l in W:
        v_str=modelo+";"+"l[0]+";"+str(l[3])
        print (v_str)
        AvaliaFile.write("\n"+v_str)
AvaliaFile.close()

#Realiza a avaliação
z=0
for elem in acertosJanelas:
    z+=1
    print("z=%d"%z)
    if z==1:
        for l in acertosJanelas[1]:
            v=[]

```

```

#Ad classe
v.append(l[0])
#Ad modelo
v.append(elem)
#Ad mínimo
v.append(0)
#Salvando a informação na tabela Avalia
Classes
    AvaliaClasses.append(v)
if isinstance (elem,str)==True:
    JanelaName=elem
else:
    for classe in elem:
        c_name=classe[0]
        print(c_name)
        media=classe[3]
        lup=-1
        for c_avalia in AvaliaClasses:
            lup+=1
            if c_avalia[0]==c_name:
                print("lup=%d"%lup)
                break
        if media>AvaliaClasses[lup][2]:
            AvaliaClasses[lup][2]=media
            AvaliaClasses[lup][1]=JanelaName

```

ANEXO A

ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA GEOCIÊNCIAS V. 33, N. 2, P.202-215, 2014

TÉCNICAS DE VISUALIZAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA O RECONHECIMENTO DE ELEMENTOS DE ANÁLISE DO RELEVO

Thaís Minatel TINÓS¹, Mateus Vidotti FERREIRA², José Eduardo ZAINÉ³,
Paulina Setti RIEDEL⁴

- (1) Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista – UNESP. Avenida 24 A,1515. CEP: 13506-900, Rio Claro – SP. Endereço eletrônico: thaistinos@gmail.com.
(2) Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista – UNESP. Avenida 24 A,1515. CEP: 13506-900, Rio Claro – SP. Endereço eletrônico: mateusvidotti@yahoo.com.br.
(3) Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP. Avenida 24 A,1515. CEP: 13506-900, Rio Claro – SP. Endereço eletrônico: jezaine@rc.unesp.br.
(4) Departamento de Geologia Aplicada, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – UNESP. Avenida 24 A,1515. CEP: 13506-900, Rio Claro – SP. Endereço eletrônico: psriedel@rc.unesp.br.

Introdução

Principais técnicas de visualização dos MDEs

Caracterização da área de estudo

Materiais e métodos

Seleção do software e aquisição/correção do SRTM

Aplicação das técnicas de visualização do MDE

Experimentação com visualizações combinadas

Avaliação dos produtos a partir de elementos de análise do relevo

Resultados

Conclusões

Agradecimentos

Referências bibliográficas

RESUMO - Atualmente os modelos digitais de elevação (MDE) têm sido intensamente empregados no mapeamento geomorfológico em ambiente computacional. No entanto, o crescente uso de modelos digitais de elevação traz a tona algumas questões sobre suas formas de visualização. O relevo sombreado, técnica mais utilizada atualmente, depende diretamente da fonte de iluminação, o que pode levar a distorções na interpretação das formas de relevo e estruturas geológicas. O objetivo deste trabalho é testar quatro técnicas de visualização de modelos digitais de elevação – curvatura em perfil, declividade, realce por filtro adaptativo e relevo sombreado – além de quatro visualizações combinadas e avaliar os produtos gerados para o reconhecimento de alguns elementos de análise do relevo, como densidade textural, amplitude local e lineamentos estruturais. Como resultados, são apresentados os produtos gerados em cada técnica para a área do Planalto de Poços de Caldas – MG e suas respectivas avaliações. Por fim, é proposta uma recomendação da melhor técnica de visualização dos MDEs para cada elemento de análise do relevo.

Palavras-Chave: SRTM; Planalto de Poços de Caldas; mapeamento geomorfológico.

ABSTRACT - Currently, digital elevation models (DEM) have been intensively employed in digital geomorphological mapping. However, the increasing use of digital elevation models brings up some questions about their forms of viewing. The shaded relief, technique most widely used, depends directly on the light source, which may lead to distortions in the interpretation of landforms and geological structures. The purpose of this study is testing four visualization techniques for digital elevation models - curvature profile, slope, enhancement by adaptive filter and shaded relief – besides four combined viewing and evaluates the products for the recognition of some relief elements analysis as textural density, local range and structural lineaments. As results are presented the products generated from each technique to plateau of Poços de Caldas – MG area and their respective evaluations. Finally, a recommendation is made for better DEMs visualization technique for the study of each relief element analysis.

Key-words: SRTM; Poços de Caldas Plateau; geomorphological mapping.

INTRODUÇÃO

Inicialmente, as feições e padrões do relevo e suas relações com as estruturas e processos geológicos eram mapeadas através de observações de campo e escassos mapas topográficos, mas com o avanço das tecnologias de sensoriamento remoto, as fotografias aéreas passaram a ser amplamente utilizadas em procedimentos estereoscópicos de interpretação visual. Atualmente, no entanto, a estereoscopia analógica vem sendo substituída

pela estereoscopia digital e/ou complementada pelo uso de modelos digitais de elevação (MDE) no desenvolvimento de mapas geomorfológicos.

A última década assistiu a um crescimento explosivo das possibilidades de utilização de modelos digitais de elevação derivados de diferentes fontes, como curvas de nível, imagens estereoscópicas de satélites e fotografias aéreas, LIDAR (Light Detection and

Ranging) e SAR (Air- and Space-borne Radar), no qual se insere o conhecido SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).

Valeriano (2008) e Silva e Santos (2007) ressaltam a elevada viabilidade de uso de modelos digitais de elevação do terreno provenientes de dados SRTM. No Brasil, o SRTM tornou-se muito popular por ser um dado gratuito, de fácil acesso e por recobrir todo o território nacional. Além disso, o país não dispõe de outro modelo com a mesma área de abrangência e com escala semelhante ou maior, o que faz com que muitos pesquisadores e profissionais recorram ao uso desse produto.

O crescente uso de modelos digitais de elevação traz a tona algumas questões sobre suas formas de visualização. No geral, os MDEs podem ser visualizados por meio de uma escala de cor, mas esse tipo de visualização não possibilita a representação de feições sutis do terreno. Então, muitos usuários recorrem à técnica de relevo sombreado, que destaca essas variações sutis da topografia e permite uma interpretação mais próxima do real da área

estudada. No entanto, Bonham-Carter (1994) ressaltava que as características do relevo podem ser melhoradas ou suprimidas pela manipulação da direção de iluminação, o que requer atenção.

Neste trabalho, discutem-se alguns dos problemas relacionados à interpretação dos modelos digitais de elevação e analisam-se algumas técnicas sugeridas por Smith e Clark (2005) para executar uma visualização mais completa e não induzida pelos efeitos da iluminação. Tem-se como objetivo testar quatro técnicas de visualização dos MDEs – curvatura em perfil, declividade, realce por filtro adaptativo e relevo sombreado – além de quatro visualizações combinadas. Por fim, apresenta-se uma avaliação dos produtos gerados e uma recomendação da melhor técnica de visualização dos modelos digitais de elevação para o realce de cada elemento de análise do relevo. A região do Planalto de Poços de Caldas – MG foi selecionada como área teste pelo relevo contrastante, feições bem marcadas, além da disponibilidade de dados e conhecimento prévio dos autores.

PRINCIPAIS TÉCNICAS DE VISUALIZAÇÃO DOS MDEs

Atualmente, as técnicas mais utilizadas para visualização dos MDEs são a elevação em escala de cor e o relevo sombreado. Enquanto a primeira promove o destaque das áreas com diferentes altitudes, a segunda destaca as formas do relevo. No entanto, como já explicitado, o relevo sombreado é altamente dependente do viés da fonte de iluminação, o que pode levar a interpretações distorcidas das feições de relevo. Buscando aprimorar a visualização, Onorati et al. (1992) recomendaram que fossem utilizadas pelo menos duas direções de iluminação, sendo uma paralela e outra perpendicular a direção predominante do relevo. Contudo essa técnica não produz apenas um produto para visualização e também não resolve todos os problemas do viés da iluminação.

Smith e Clark (2005) realizaram um estudo que compara diversas técnicas de visualização das formas do relevo em modelos digitais de elevação e concluíram que não é possível gerar um produto único que não tenha a interferência da iluminação e carregue ainda o realce das formas do relevo. Os autores recomendam

então que, em um mapeamento, inicialmente se opte por uma técnica que não dependa da iluminação. Smith e Clark (2005) destacam como solução o uso em conjunto das técnicas de curvatura em perfil, declividade e realce por filtro adaptativo. Do ponto de vista metodológico, essas técnicas fornecem uma boa representação da superfície independente do ângulo de iluminação.

A técnica de curvatura em perfil reflete a taxa de variação da declividade na direção de sua orientação e está relacionada ao caráter convexo/côncavo do terreno. Esse parâmetro realça as rupturas de declive positivas e negativas do relevo, normalizado a elevação e permitindo a visualização das variações locais da topografia.

Já a técnica de declividade é uma derivada do terreno bastante utilizada para quantificação de feições do relevo, mas pouco utilizada para visualização das mesmas por não ser considerada tão agradável quanto o relevo sombreado para interpretação. Clark e Meehan (2001) sugerem que a declividade seja visualizada em uma escala de cor do branco

para preto, em que branco represente a menor declividade e preto a maior declividade. Desta forma obtém-se um resultado com aspecto semelhante ao mapa de sombreado do relevo, mas livre do viés de iluminação.

A técnica de realce por filtro adaptativo é um procedimento empregado para realçar os contrastes presentes no relevo. Ela é descrita com maior detalhe por Fahnestock e Schowengerdt (1983) e se baseia no uso de uma janela móvel, sendo a seguinte fórmula para o cálculo do pixel central:

$$X = \frac{MDE - MinMDE}{MaxMDE - MinMDE}$$

(1)

Em que: “X” é o valor do pixel central; “MDE” é o valor de elevação no centro da janela; “MinMDE” é o valor mínimo de elevação dentro da janela; “MaxMDE” é o valor máximo de elevação dentro da janela. O tamanho da janela móvel pode variar de acordo com a resolução do modelo e com a escala de trabalho.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A região do Planalto de Poços de Caldas situa-se na divisa dos estados de Minas Gerais e São Paulo, como pode ser observado na Figura 1, e destaca-se como o maior complexo alcalino do Brasil. Ocupando uma área de cerca de 800 km², o planalto abrange partes dos municípios de Poços de Caldas, Caldas, Andradas e Águas da Prata. (Cavalcante et al., 1979).

O planalto localiza-se na borda ocidental da Mantiqueira, em contato com os extremos orientais da bacia sedimentar do Paraná. Dentro das feições geomorfológicas da região Sudeste do Brasil, o planalto de Poços de Caldas situa-se nos domínios do Planalto Atlântico, inserido na província geomorfológica denominada planalto Sul de Minas. Ao norte e oeste do planalto ocorre também a província geomorfológica denominada Zona Cristalina do Norte, que mantém um relevo de transição entre as terras altas do planalto do Sul de Minas e da Mantiqueira para a região rebaixada da Depressão Periférica Paulista (Cavalcante et al, 1979).

De acordo com Ellert (1959), a morfologia da área representa um exemplo do modelado

Smith e Clark (2005) afirmam que após a aplicação dessas três técnicas, poderia então haver uma complementação com a técnica de relevo sombreado com iluminação paralela e ortogonal para um destaque das feições sutis do relevo.

Todos os produtos gerados a partir dessas técnicas levam à reflexão sobre o emprego de uma ferramenta que possibilitasse a delimitação de feições do relevo em imagens visualizadas em perspectiva. Contudo, essa possibilidade se mostra inviável por hora, pois assim como afirmam Smith e Clark (2005), o procedimento de vetorização não está implementado adequadamente em nenhum dos sistemas de informação geográfica existentes.

Com o interesse de verificar a validade das considerações efetuadas pelos autores, nesse trabalho optou-se por testar as técnicas de visualização do MDE sugeridas e avaliar os resultados obtidos em uma área de estudo no Brasil.

estrutural dômico com diques anelares, surgindo como unidade individualizada e sendo delimitado por um anel quase completo, formando um complexo de rochas efusivas e intrusivas. O dique anelar que circunda o planalto é saliente na topografia em três quadrantes: norte, oeste e sul; no quadrante leste não há expressão morfológica do anel de tinguaito.

Com cerca de 35 km de diâmetro no sentido NE-SW e 30 km no sentido NW-SE, o planalto salienta-se de 500 a 700 m acima do relevo cristalino que o rodeia. Suas cotas alcançam 1.637 m no morro do Cristo Redentor, enquanto o interior se nivela em cerca de 1.300 m (Christofolletti, 1972). Verifica-se no interior do planalto de Poços de Caldas uma zona rebaixada onde se desenvolve uma topografia de morros e colinas com vertentes suaves, ao passo que nas bordas, a estrutura anelar é constituída por um relevo dissecado repleto de vertentes abruptas. Chistofolletti (1972) detalha uma área de topografia movimentada na porção oriental do planalto, com declividades acima de 20° e perfeitamente distinta das demais. No

restante do interior planaltino o autor confirma uma topografia menos movimentada, com

declividades suaves e topos aplainados e largos.

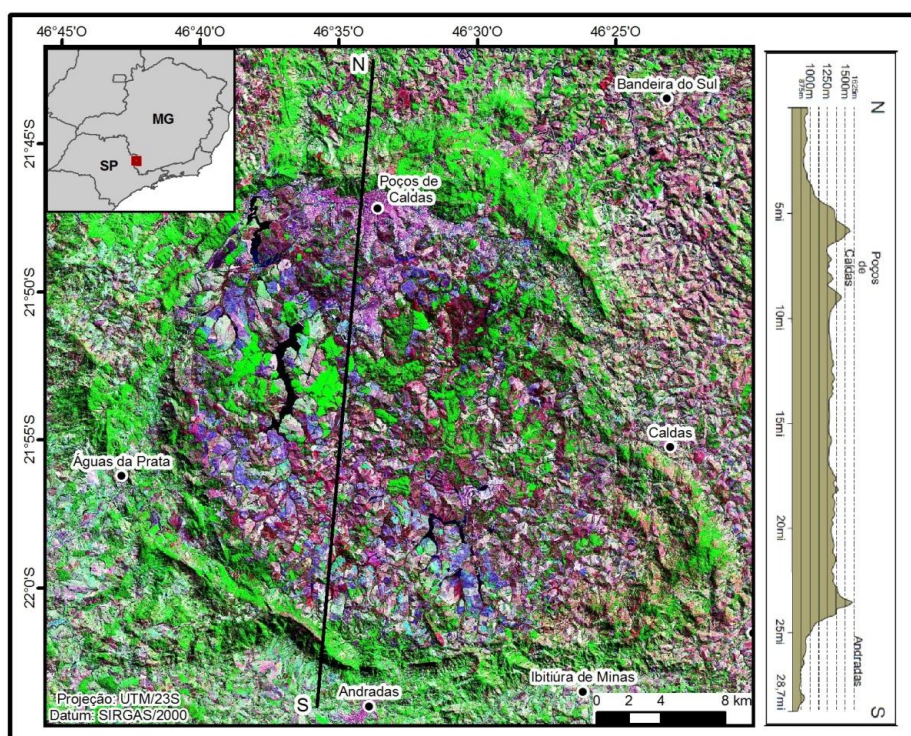


Figura 1. Localização do planalto de Poços de Caldas.

A evolução hipotética do Planalto de Poços de Caldas foi descrita por Leinz e Amaral (1998) como sendo um vulcanismo de idade mesozoica nas rochas encaixantes, onde ocorreu colapso da parte central, determinando a formação da imensa caldeira. O intenso falhamento, conforme originalmente relatado por Ellert (1959), deu origem a uma hidrografia planaltina fortemente controlada pela litologia e pelo sistema de fraturas.

Ellert (1959) destaca a ocorrência de quatro tipos litológicos no interior do planalto: 1 - rochas efusivas e hipoabissais (tinguaítos e fonólitos), 2 - rochas plutônicas (nefelina sienitos, lujauritos e chibinitos), 3 - brechas, tufo e conglomerados e 4 - rochas potássicas (associadas a processos metassomáticos). No entanto, o processo intrusivo que deu origem ao planalto ocorreu em domínios do embasamento

cristalino, ficando o mesmo cercado por granitos, gnaisses e migmatitos pré-cambrianos de alto grau metamórfico, policíclicas e polideformadas pertencentes ao Maciço de Guaxupé (Moraes e Jiménez-Rueda, 2008).

Quanto aos solos, Alberti (2008) afirma que apesar das litologias possuírem a mesma composição mineralógica, se diferenciando unicamente pelo modo de ocorrência - as rochas vulcânicas e plutônicas/intrusivas do planalto, - apresentam um perfil de alteração distinto e possuem comportamentos geotécnicos diferenciados. Segundo Liporaci (1994), os fonólitos se alteram gerando um solo residual mais argiloso, enquanto os nefelinas sienitos apresentam um perfil de alteração típico, constituído por concreções lateríticas e um solo com textura argilosiltosa.

MATERIAIS E MÉTODOS

A estrutura geral do trabalho pode ser dividida em três etapas:

Seleção do software e aquisição/correção do SRTM

Para a realização do trabalho foi empregado o software ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012). Esse software foi selecionado por ser popular entre os pesquisadores e profissionais que trabalham com mapeamentos do meio físico, além de ser

de fácil manipulação e abranger um conjunto de ferramentas que atendem aos procedimentos propostos.

O modelo digital de elevação derivado do SRTM foi selecionado por ser um material gratuito e de fácil acesso. O SRTM pode ser obtido diretamente no site da NASA ou através de inúmeras instituições que já realizaram algum tipo de processamento nos dados, objetivando correções no modelo. Aqui no Brasil, destacam-se os SRTM disponibilizados pela EMBRAPA (Brasil em Relevo) e pelo INPE (TOPODATA).

Neste trabalho, os SRTM utilizados foram adquiridos no site da organização *Global Land Cover Facility* – GLCF (<http://glcf.umd.edu/>), vinculada a University of Maryland - EUA. Foram realizados testes prévios com os SRTM obtidos na EMBRAPA e no INPE, no entanto os resultados não foram satisfatórios para as áreas testadas. No geral, todos os modelos apresentaram algum tipo de ruído, mas o modelo *Finessed filled*, processado pela GLCF, foi o que apresentou o menor nível, além de ter algumas falhas de imageamento removidas.

Após a aquisição do SRTM, é recomendada a verificação de valores discrepantes (*outliers*) para a validação do modelo. Reuter et al. (2008) discutem diversas abordagens para eliminar e reduzir erros e ruídos em diversos tipos de modelo digital de elevação. Dentre as sugestões apresentadas, as que se aplicam ao produto selecionado e são passíveis de correção sem informação adicional são a redução de valores discrepantes e o preenchimento de micro-bacias.

Para as áreas teste, utilizou-se a metodologia apresentada por Felícisimo (1994) para a redução de valores discrepantes. Esta metodologia busca pixels com valores discrepantes da média de seus pixels vizinhos por meio de uma janela móvel de 3x3 pixels. A princípio verificou-se que não havia ruído significativo nos SRTM adquiridos, demonstrando a boa qualidade do modelo empregado. As poucas áreas de discrepância encontradas foram identificadas como picos e vales, não sendo necessário corrigi-las. Já o preenchimento de micro-bacias se fez por meio da ferramenta *Fill*, disponível no software ArcGIS 10.1 (ESRI, 2012), de acordo com método proposto por Tarborton et al. (1991).

Aplicação das técnicas de visualização do MDE

Quatro técnicas sugeridas por Smith e Clark (2005) foram selecionadas para teste e avaliação nesse trabalho – curvatura em perfil, declividade, realce por filtro adaptativo e relevo sombreado.

Técnica 1 - A técnica de curvatura em perfil foi aplicada através da ferramenta *Curvature*, utilizando uma janela móvel de 3x3 pixels. O resultado desse processamento foi visualizado em uma escala de cor do preto para o branco.

Técnica 2 - A declividade foi elaborada por meio da ferramenta *Slope*, utilizando também uma janela móvel de 3x3 pixels. O resultado desse processamento foi visualizado em uma escala de cor do branco para o preto.

Técnica 3 - A técnica de realce por filtro adaptativo foi aplicada através da ferramenta *Raster Calculator*, na qual foi aplicada a Equação (1), utilizando uma janela móvel de 10x10 pixels. O resultado desse processamento foi visualizado em uma escala de cor do branco para o preto.

Técnica 4 - Por fim, a técnica de relevo sombreado foi implementada por meio da ferramenta *Hillshaded* utilizando uma janela móvel de 3x3 pixels. A escolha dos azimutes de iluminação foi realizado de acordo com Wise et al. (1985) que sugerem que o relevo é mais claramente visualizado quando iluminado a partir de uma direção ortogonal à tendência principal de lineamentos. No Planalto de Poços de Caldas, segundo o estudo de Moreira et al. (2007), a direção predominante dos lineamentos é 140° (NW-SE), assim a direção ideal do azimute de iluminação para a visualização do relevo seriam 50° ou 230°. Nesse estudo, optou-se pelo azimute de 50° pois esse ressaltou as principais vertentes do dique anelar que circunda o planalto de Poços de Caldas. Como complemento ao relevo sombreado 50°, foi gerado um segundo relevo sombreado com azimute de 320° por ser perpendicular ao primeiro. Para os dois produtos adotou-se 20° como ângulo de elevação da fonte de iluminação. Os resultados desse processamento foram visualizados em uma escala de cor do preto para o branco.

Experimentação com visualizações combinadas

Quatro visualizações combinadas foram experimentadas conforme descrito a seguir. As visualizações combinadas 1 e 2 tiveram o objetivo de acrescentar um elemento textural ao MDE, enquanto as visualizações combinadas 3 e 4 tiveram como foco a representação das formas do relevo com a menor interferência possível do viés de iluminação.

Visualização combinada 1 - Já bastante conhecida, essa visualização combinada é constituída pelo modelo digital de elevação (em uma escala de cores) e pelo produto obtido com a técnica 4 (relevo sombreado com azimuth de 50°) sobrepostos com um nível de transparência de 40%.

Visualização combinada 2 - Essa segunda combinação é formada pelo modelo digital de elevação (em uma escala de cores) e pelo produto obtido com a técnica 2 (declividade com a escala de cores do branco para o preto) sobrepostos com um nível de transparência também de 40%.

Visualização combinada 3 - Na terceira visualização combinada foram empregados os dois produtos resultantes da técnica 4, ou seja, os relevos sombreados com azimuths de iluminação paralelo (320°) e ortogonal (50°) para um destaque das feições do relevo. Uma composição colorida foi realizada e o relevo sombreado de azimuth 50° foi inserido no canal vermelho e o relevo sombreado de azimuth 320° nos canais verde e azul. Dessa forma, as vertentes direcionadas para o ângulo de 320°

aparecem em tonalidades de azul enquanto as vertentes direcionadas para o ângulo 50° aparecem em tons de vermelho e as áreas planas em tons de cinza.

Visualização combinada 4 - A quarta combinação envolve do produto gerado pela técnica 2 e os produtos resultantes da técnica 4, ou seja, a declividade (com a escala de cores do branco para o preto) e os relevos sombreados com azimuths de iluminação paralelo (320°) e ortogonal (50°). Uma nova composição colorida foi elaborada e a declividade foi inserida no canal vermelho, o relevo sombreado de azimuth 50° foi inserido no canal verde e o relevo sombreado de azimuth 320° no canal azul. Na figura resultante desse processo, as vertentes direcionadas para o ângulo de 320° aparecem com tonalidades de azul, as vertentes direcionadas para o ângulo 50° aparecem em tons de verde e as áreas planas são visualizadas em tons claros de vermelho.

Avaliação dos produtos a partir de elementos de análise do relevo

Os produtos gerados através das quatro técnicas e das quatro visualizações combinadas foram avaliados de acordo com alguns elementos de análise do relevo (Tabela 1) propostos por Howard (1965), Soares e Fiori (1976) e IBGE (2009). Em cada produto buscou-se determinar os elementos de análise passíveis de identificação e por fim, sugerem-se os melhores produtos para o estudo de cada um dos elementos de análise do relevo.

Tabela 1. Elementos de análise do relevo e suas respectivas classes de análise.

Classes de análise	Elementos de análise
Análise da densidade textural	Densidade dos elementos de drenagem
	Densidade dos elementos do relevo
Análise das características do relevo	Amplitude local
	Declividade
Análise das estruturas geológicas	Linhas de rupturas de declive
	Lineamentos e alinhamentos de relevo
	Padrões de drenagem

Destaca-se que esses elementos foram selecionados por serem compatíveis a escala de trabalho. Outros elementos propostos pelos autores citados como forma de vertente e forma e extensão dos topos não foram considerados, pois não podem ser visualizados com precisão

na escala do modelo derivado de dados SRTM. No entanto, em trabalhos que utilizem modelos derivados de dados com maior nível de detalhe, esses elementos podem ser incluídos para a avaliação.

RESULTADOS

Como resultados, apresentam-se as Figuras 2, 3, 4 e 5 que reúnem os produtos gerados nos processamentos das quatro técnicas testadas e as Figuras 6, 7 e 8 que abrangem os produtos das visualizações combinadas.

Na Figura 2 apresenta-se o produto gerado pela técnica 1, de curvatura em perfil. A principal característica desse processamento é a normalização da altitude nas imagens, ficando evidenciadas as rupturas de declive. Nota-se que, apesar da técnica estar relacionada ao caráter convexo/côncavo do terreno, não é possível distinguir as formas das vertentes visualmente, mas surge um elemento textural que possibilita a diferenciação de regiões com mais e menos textura, as quais refletem áreas com relevo mais ou menos movimentado.

Observa-se na Figura 2 que essas variações texturais possibilitam a diferenciação no interior da caldeira de zonas descritas por Chistofolletti (1972). Visualiza-se claramente uma zona em meia lua na parte ocidental do planalto de menor textura, que corresponde a uma área rebaixada onde se desenvolve uma topografia suave com relevo de morrotes e

colinas. Já na porção oriental do planalto, uma zona de textura mais rugosa se destaca com topografia movimentada associada ao relevo de morros e morros altos.

Essas duas zonas de diferentes texturas podem ser melhor analisadas através dos perfis de elevação e de curvatura mostrados na Figura 2. Os perfis de elevação referentes aos trechos A-B e C-D mostram a transição de um relevo com declividades suaves e com diferença amplitudinal menor que 100 metros para um relevo com declividades altas e com amplitude local maior que 100 metros. Nos perfis de curvatura correspondentes, nota-se que o gráfico oscila acompanhando essa transição, ou seja, uma menor frequência ocorre para áreas com menor densidade textural enquanto que a frequência aumenta para áreas com maior densidade textural.

Foi observado durante os testes que essa técnica destacou os ruídos presentes nos dados SRTM, gerando um “efeito listrado” em algumas áreas. É preciso atentar-se para que os ruídos não interfiram na análise do produto gerado.

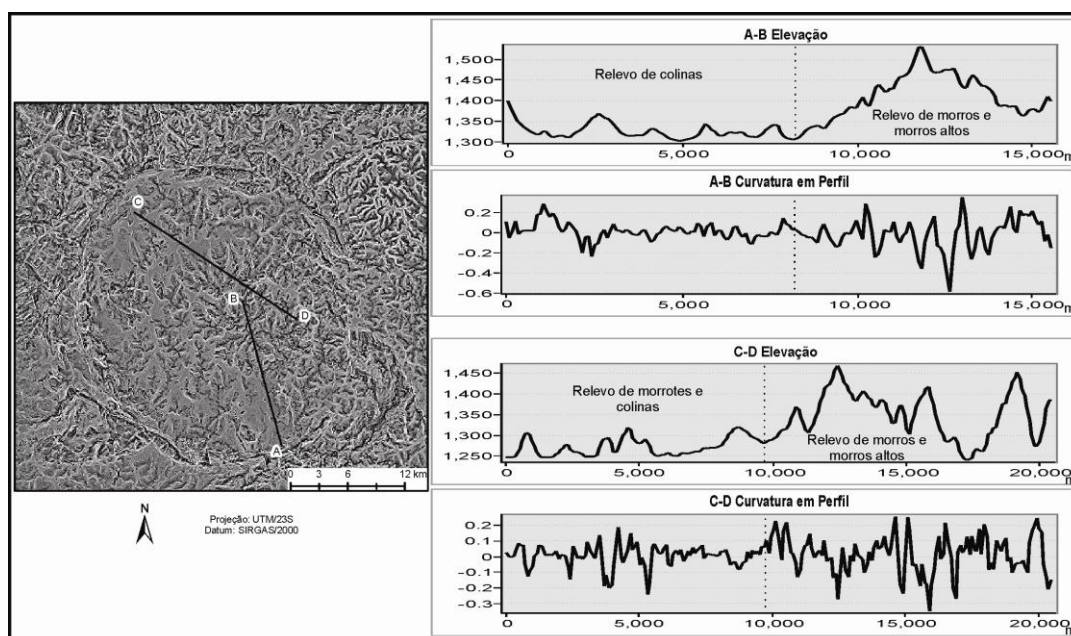


Figura 2. Produto resultante da técnica 1 (Curvatura em perfil) e gráficos representativos do perfil de elevação e frequência de curvatura nos trechos A-B e C-D.

A Figura 3 exibe o produto gerado a partir da técnica 2, de declividade. Apesar de bastante utilizada para a caracterização de áreas de estudo, essa técnica mostra sua importância em

etapas prévias de reconhecimento do terreno graças ao efeito de profundidade obtido com a escala de cores empregada. O produto gerado

tem aspecto semelhante ao relevo sombreado, mas sem a interferência da iluminação.

Nota-se nas Figuras 3A e 3D que o relevo montanhoso foi bastante evidenciado, destacando as serras constituintes do dique anelar que circunda o planalto de Poços de Caldas e as serras da Fumaça (noroeste da área) e da Pedra Branca (sudeste da área). Essa

técnica também ressaltou o relevo colinoso (Fig. 3C) e a extensa planície fluvial do ribeirão das Antas (Fig. 3B) no interior do planalto. É possível observar, com mais detalhe que nas outras técnicas, a extensão desse padrão colinoso e suas feições. Além disso, as quebras de declive e algumas cristas alinhadas aparecem bem marcadas.

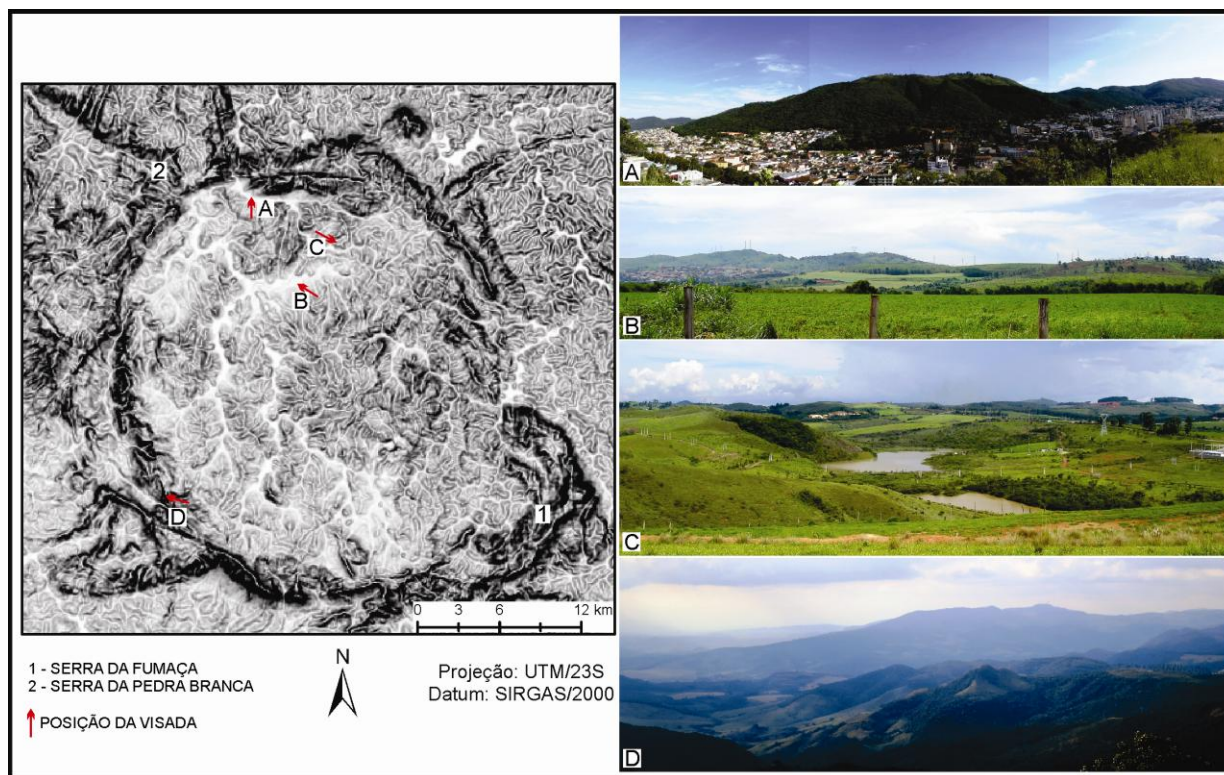


Figura 3. Produto resultante da técnica 2 (Declividade); A. Serra de São Domingos; B. Planície fluvial do ribeirão das Antas em contato com relevo colinoso nas proximidades do aeroporto; C. Visão a sudeste da Represa Saturnino de Brito; D. Trecho do dique anelar fotografado da Serra do Gavião. Fonte: TINÓS, T. M.

Na Figura 4 apresenta-se o produto resultante da técnica 3, de realce por filtro adaptativo, a qual possibilita a identificação de topos (preto), encostas (tons de cinza) e terrenos planos (branco). Essa técnica favorece a visualização de rupturas de declive e de algumas características relativas à drenagem.

Observa-se na Figura 4A que os fundos de vale foram bastante evidenciados por essa técnica. É possível identificar alguns vales abertos com fundo plano nos cursos d'água maiores como o ribeirão das Antas (Fig. 4B), e fundos de vale mais encaixados nos canais de menor ordem que cortam setores de vertentes íngremes. Também verificam-se padrões de

drenagem diferenciados, como um padrão treliça nas áreas elevadas do embasamento cristalino a noroeste do planalto (Fig. 4C) e um padrão dendrítico e sub-dendrítico associado a bacia do rio Pardo a nordeste da área (Fig. 4D). No interior do planalto predomina um padrão dendrítico, mas em algumas áreas a drenagem é condicionada por um forte controle estrutural, com drenagens retilíneas (Fig. 4D) e feições de padrão semi-radial centrífugo (Fig. 4E).

Assim como a técnica 1, de curvatura em perfil, a técnica de realce por filtro adaptativo pode destacar ruídos presentes nos dados SRTM dependendo do tamanho da janela móvel utilizada.

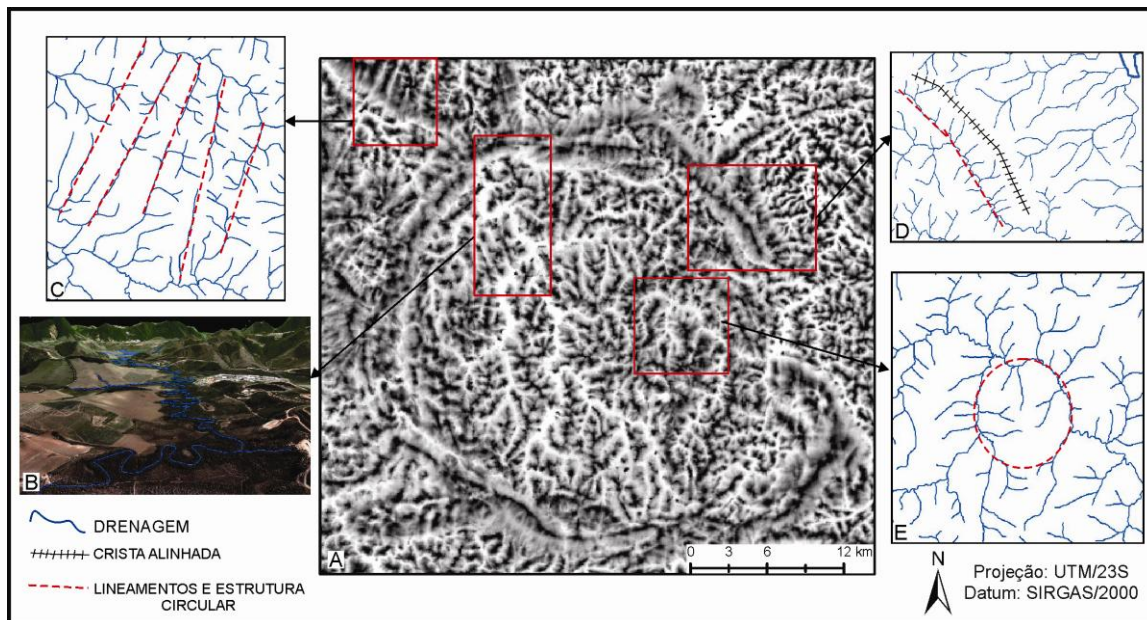


Figura 4. A. Produto resultante da técnica 3 (Realce por filtro adaptativo); B. Imagem de um trecho do vale aberto do ribeirão das Antas; C. Padrão de drenagem treliça associado a fraturas nas Serras do Boqueirão e da Fumaça; D. Padrão de drenagem dendrítico e sub-dendrítico associado a bacia do rio Pardo e drenagem encaixada em fratura no sopé do Serrote do Maranhão; E. Padrão de drenagem semi-radial centrífugo no interior do planalto.

As Figuras 5A e 5B são o resultado da aplicação da técnica 4, de relevo sombreado com azimutes paralelo e ortogonal a principal direção dos lineamentos. Essa se mostrou uma técnica muito agradável para a visualização de alinhamentos e da densidade textural dos elementos do relevo, no entanto, ela é influenciada pelo viés da iluminação. É possível notar nas áreas destacadas, determinadas feições (principalmente partes do

dique anelar que circunda o planalto de Poços de Caldas) e alinhamentos que foram suprimidos ou ressaltados de acordo com o azimute de iluminação. Esse fator pode influenciar na identificação de padrões estruturais, linhas de ruptura do declive e numa análise da densidade dos elementos do relevo, gerando confusão para delimitar áreas com padrões de relevo semelhantes.

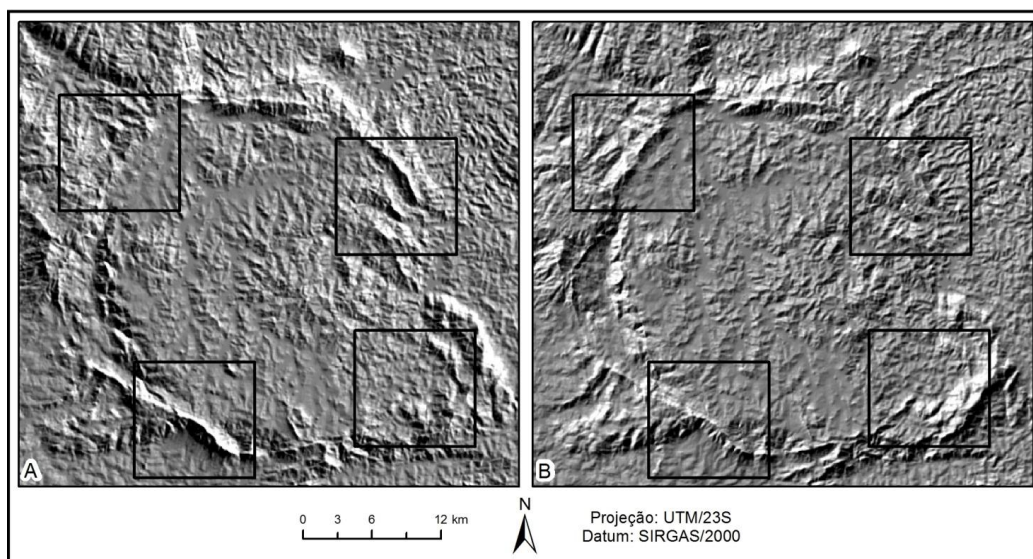


Figura 5. A. Produto resultante da técnica 4 (Relevo sombreado com azimute de iluminação de 50°); B - Produto resultante da técnica 4 (Relevo sombreado com azimute de iluminação de 320°).

Os resultados obtidos a partir das visualizações combinadas 1 e 2 são mostrados nas Figuras 6 A e 6B. Nessas duas figuras observa-se que ocorreu uma adição de aspectos texturais à elevação altimétrica, o que possibilitou a visualização de um maior nível de detalhe de alguns elementos de análise do relevo.

Bastante utilizada, a visualização combinada 1, do modelo digital de elevação em escala de cores + relevo sombreado (Fig. 6A), tem como diferencial uma percepção da amplitude local associada a um produto que possibilita uma visualização da densidade

textural do relevo. Já a visualização combinada 2 (Fig. 6B), do modelo digital de elevação em escala de cores + declividade, proporciona uma boa visualização de elementos de análise como amplitude, densidade textural do relevo e linhas de rupturas de declive sem a utilização de um produto influenciado pela iluminação. Além disso, a declividade permite uma visualização mais detalhada do relevo suavizado e todas as suas feições no interior do planalto. Comparativamente, a Figura 6B apresenta uma fidelidade maior às feições reais do terreno que a Figura 6A por ser livre do viés de iluminação.

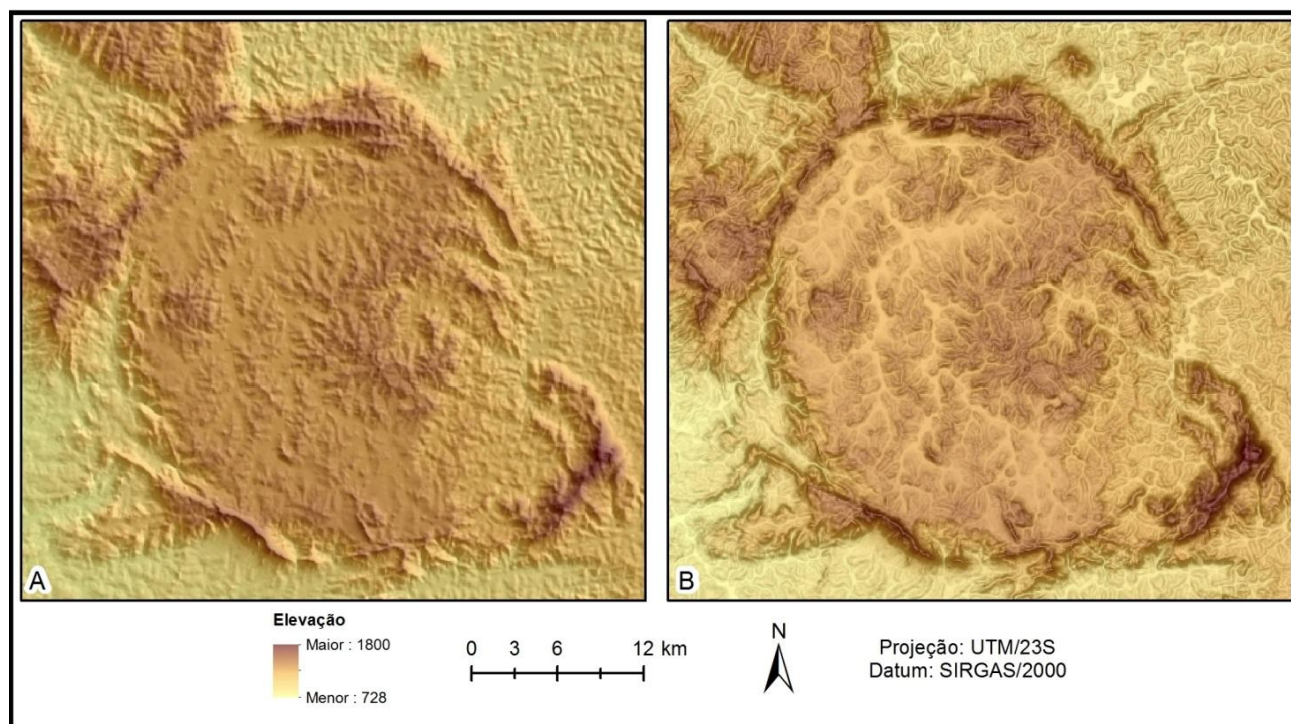


Figura 6. A. Visualização combinada 1 (modelo digital de elevação (em uma escala de cores) + relevo sombreado com azimuth de 50°); B - Visualização combinada 2 (modelo digital de elevação (com uma escala de cores) + declividade (com a escala de cores do branco para o preto).

Os resultados obtidos a partir das visualizações combinadas 3 e 4 são mostrados nas Figuras 7 e 8. Nota-se que houve um ganho ainda maior na visualização de detalhes do terreno comparado as duas combinações anteriores. A utilização de um par de imagens com azimutes paralelo e ortogonal em uma composição colorida minimiza o efeito do viés de iluminação e promove uma representação mais fidedigna do relevo.

A visualização combinada 3, ilustrada pela composição colorida entre os azimutes 50° e 320° na Figura 7A, evidenciou mais que as outras técnicas e combinações testadas os

alinhamentos de relevo e lineamentos estruturais da área. A Figura 7B apresenta o mapeamento dos principais lineamentos, alinhamentos de relevo e estruturas circulares extraídos da visualização combinada 3. Observa-se que além da direção preferencial 140°(NW-SE), foi identificada também uma grande quantidade de lineamentos na direção 30°(NE-SW), principalmente a noroeste da área estudada. De acordo com Moreira et al. (2007), esse par conjugado de direções pode estar associado a falhas transcorrentes. Já citadas por Almeida Filho e Paradella (1977), algumas estruturas circulares, provavelmente associadas

a cones vulcânicos, também são visualizadas no

interior do planalto a partir dessa visualização.

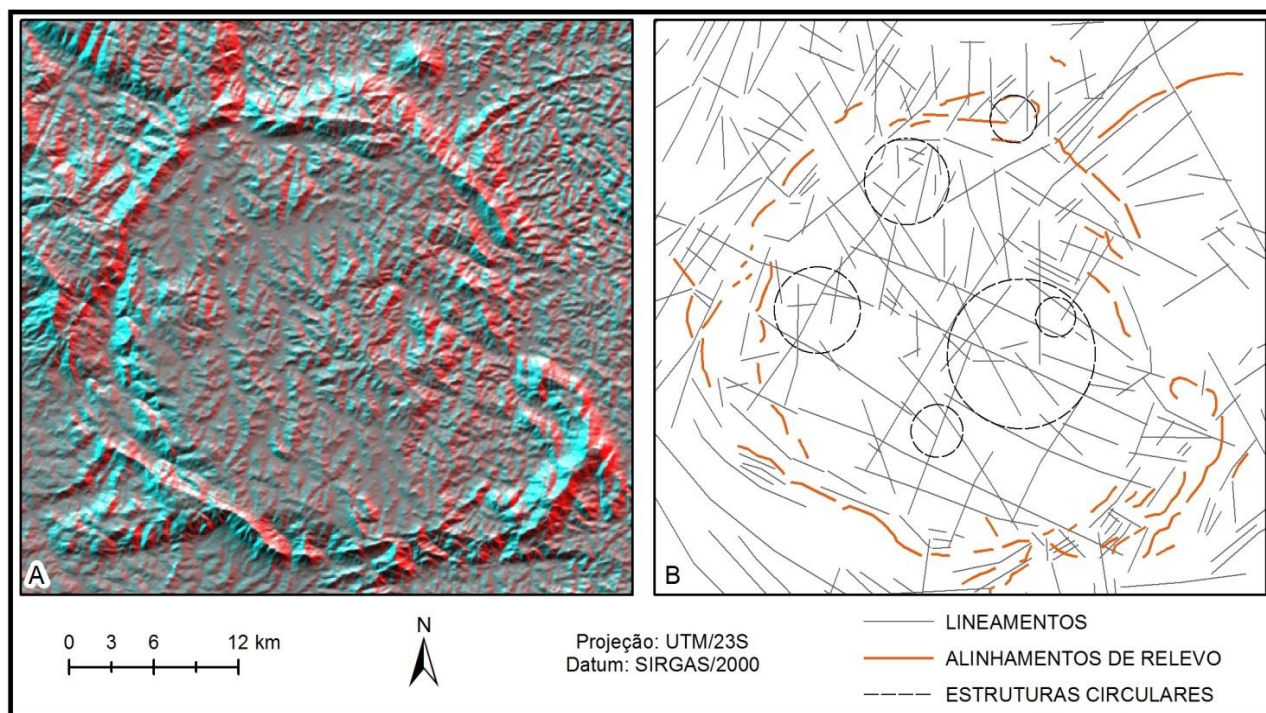


Figura 7. A. Visualização combinada 3 (Composição colorida entre os azimutes 50° e 320°); **B-** Principais lineamentos, alinhamentos de relevo e estruturas circulares identificados a partir da visualização combinada 3.

A visualização combinada 4, ilustrada pela composição colorida entre os azimutes 50° e 320° e a declividade, foi a que apresentou melhores resultados para uma visualização mais detalhada das feições do relevo. Conforme pode ser observado na Figura 8A, os alinhamentos aparecem bem marcados e rupturas de declive e fundos de vale também são destacados. Essa composição ainda possibilita uma boa visualização das direções das vertentes, podendo ser aplicada na identificação preliminar de padrões de relevo e áreas relevantes para o estudo de processos erosivos.

A partir dessa visualização, um mapa de compartimentos geomorfológicos simplificado foi gerado baseado na proposta de Cavalcanti et al. (1979). Os compartimentos propostos pelos autores foram mantidos (Planalto de Poços de Caldas, Planalto de São Pedro de Caldas, Subzona de São José do Rio Pardo e Subzona de Amparo), mas seus limites generalizados foram reinterpretados de acordo com a visualização combinada 4 e assim redefinidos com maior detalhe para a escala trabalhada.

Além disso, essa composição permitiu o detalhamento de alguns compartimentos, principalmente do planalto de Poços de Caldas, conforme mostra a Figura 8B.

A partir da avaliação dos produtos gerados através das quatro técnicas de visualização de modelos digitais de elevação e das quatro visualizações combinadas, elaborou-se uma tabela com indicações dos melhores produtos para o estudo de cada elemento de análise do relevo. A tabela 2 mostra os resultados obtidos.

Dentre as técnicas e visualizações combinadas testadas, a técnica 3, de realce por filtro adaptativo, se destacou na análise dos padrões de drenagem e de densidade dos elementos de drenagem por ressaltar os fundos de vale, e consequentemente permitir uma diferenciação de áreas com mais ou menos canais e sob diferentes controles estruturais. Já visualização combinada 2 (modelo digital de elevação (em uma escala de cores) + declividade) prevaleceu na análise da amplitude local, pois diminui a generalização gerada apenas pela elevação em cores e possibilita a visualização da amplitude em maior detalhe.

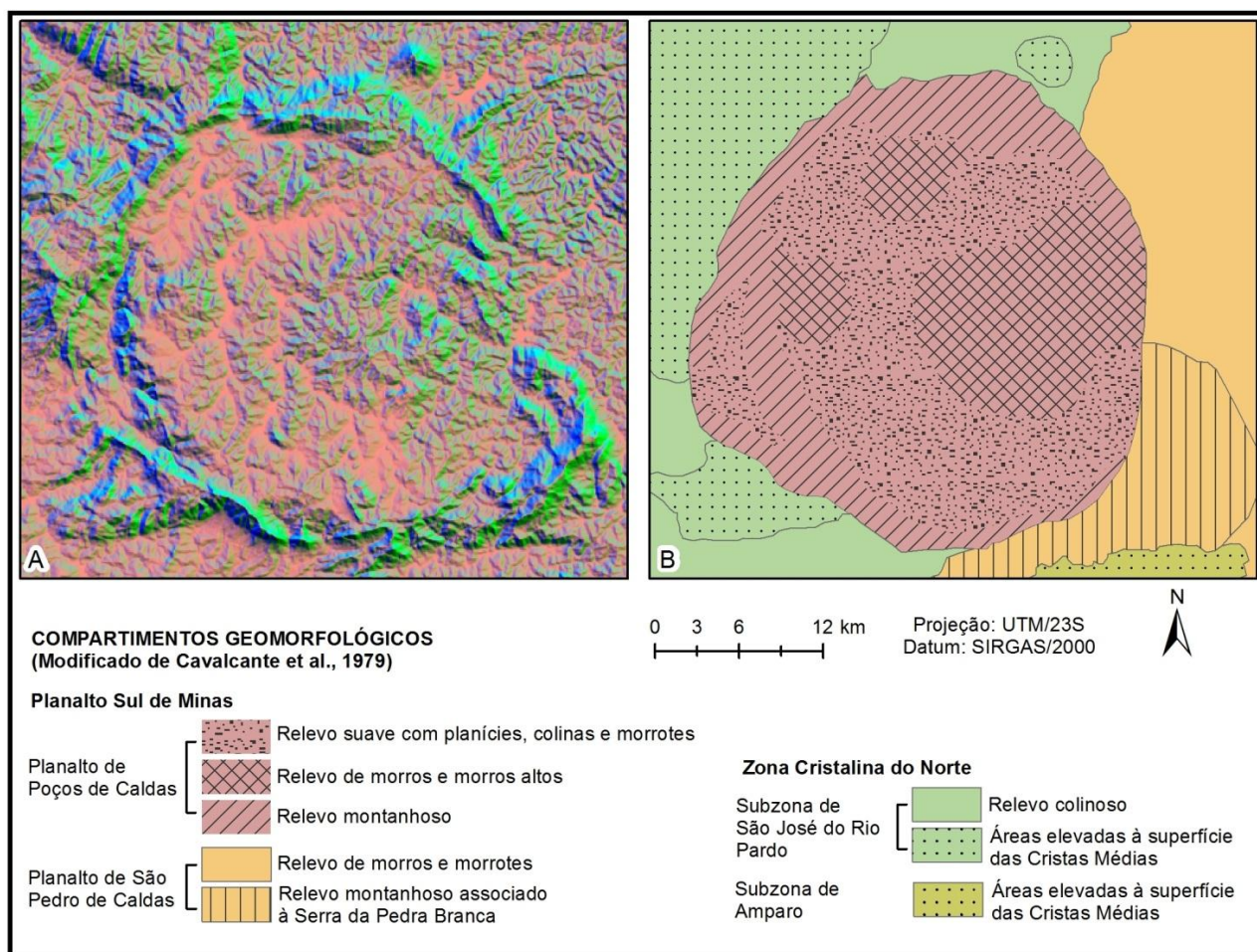


Figura 8. A. Visualização combinada 4 (Composição colorida entre os azimutes 50° e 320° e a declividade); B – Mapa de compartimentos geomorfológicos delimitados a partir da visualização combinada 4.

Tabela 2. Melhores produtos para o estudo de cada elemento de análise do relevo.

Elemento de análise de análise do relevo	Melhores produtos
Densidade dos elementos de drenagem	Técnica 3 - Realce por filtro adaptativo
Densidade dos elementos do relevo	Visualização combinada 3 Visualização combinada 4
Amplitude local	Visualização combinada 2
Declividade	Técnica 2 – Declividade
Linhas de rupturas de declive	Técnica 3 - Realce por filtro adaptativo Visualização combinada 4
Lineamentos e alinhamentos de relevo	Visualização combinada 3
Padrões de drenagem	Técnica 3 - Realce por filtro adaptativo

A visualização combinada 3 (Composição colorida entre os azimutes 50° e 320°) apresentou o melhor desempenho no reconhecimento de lineamentos estruturais e alinhamentos de relevo e se mostrou um bom instrumento para a análise estrutural da área. Por fim, a visualização combinada 4 (Composição colorida entre os azimutes 50° e

320° e a declividade) se destacou na identificação das quebras de declive, pois refinou as características do relevo sombreado com o acréscimo da declividade, destacou os fundos de vale e ainda proporcionou a melhor visualização da densidade textural dos elementos do relevo.

CONCLUSÕES

O crescente uso de modelos digitais de elevação tem permitido uma maior dinamicidade aos estudos e pesquisas em meio físico, pois reduz a distância entre o objeto de estudo e o pesquisador. As técnicas de visualização testadas nesse trabalho mostram que os MDEs podem auxiliar desde o reconhecimento da área até estudos específicos de compartimentação do relevo.

O objetivo do trabalho foi alcançado na medida em que as quatro técnicas de visualização de modelos digitais de elevação foram testadas e avaliadas, além das quatro visualizações combinadas propostas. As combinações destacam-se como um avanço em relação às técnicas testadas individualmente, pois agregam propriedades texturais que possibilitam uma melhor visualização de características como profundidade e forma.

A visualização combinada 1 (modelo digital de elevação + relevo sombreado), tão utilizada atualmente em diversos estudos, se mostrou a menos relevante das combinações testadas. Caso se opte por utilizá-la, seria importante trabalhá-la conjuntamente com a visualização combinada 2 (modelo digital de elevação em uma escala de cores + declividade), pois essa

permite uma visualização imparcial do relevo e propicia uma análise interpretativa mais detalhada.

Recomendam-se, no entanto, como melhores técnicas de visualização dos MDEs as visualizações combinadas 3 (Composição colorida entre os azimutes 50° e 320°) e 4 (Composição colorida entre os azimutes 50° e 320° + declividade). Os produtos gerados a partir dessas composições coloridas permitem o reconhecimento de feições do relevo em um nível de detalhe maior que em todas as técnicas testadas nesse artigo e são mais fieis às formas reais do relevo, graças ao uso de dois azimutes de iluminação.

Por fim, considera-se que cada uma das técnicas testadas ressalta características específicas do relevo e os resultados obtidos podem ser mais ou menos satisfatórios de acordo com as características da área estudada e a escala de trabalho. Apesar de ter sido apresentada uma proposta baseada em dados SRTM, todas as técnicas sugeridas podem ser aplicadas para a visualização de MDEs obtidos de outras fontes e em diferentes escalas, podendo até utilizar-se de diferentes elementos de análise do relevo.

AGRADECIMENTOS

À Capes pelas bolsas de doutorado concedidas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALMEIDA FILHO, R.; PARADELLA, W. R. **Estudo Maciço alcalino de Poços de Caldas através de imagens landsat com ênfase em mineralizações radioativas**. São José dos Campos, 1976, 148 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Disponível em: <<http://urlib.net/6qtX3pFwXQZ3r59YD6/GLCQx>>. Acesso em: 19 nov. 2013.
2. ALBERTI, H. L. C. **Caracterização fisiográfica e avaliação hidrológica na bacia do Ribeirão das Antas, Planalto de Poços de Caldas, MG**. Campinas, 2008. 91p. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas.
3. BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists**. Elsevier Science: Oxford, 416p., 1994.
4. CAVALCANTE, J.C.; CUNHA, H.C.; CHIEREGATI, L.A.; KAEFER, L.Q.; ROCHA, J.M.; DAITX, E.C.; COUTINHO, M.G.N.; HAMA, M.; YAMAMOTO, K.; DRUMOND, J.B.V.; ROSA, D.B.; RAMALHO, R. **Projeto Sapucaí**; Estado de Minas Gerais e São Paulo. Relatório Final... Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, Série Geologia, 299p., 1979.
5. CLARK, C. D.; MEEHAN, R. T. Subglacial bedform geomorphology of the Irish Ice Sheet reveals major configuration changes during growth and decay. **Journal of Quaternary Science**, v. 16, n. 5, p. 483–496, 2001.
6. CHRISTOFOLETTI, A. Características fisiográficas do planalto de Poços de Caldas (MG – Brasil). **Geomorfologia**, São Paulo, v. 32, p. 1-25, 1972.
7. ELLERT, R. Contribuição à geologia do maciço alcalino de Poços de Caldas. **Bol. Fac. Fil. Ciên. Letras USP**, São Paulo, v. 237, n.18, p.5-63, 1959.
8. ESRI – ENVIRONMENTAL SYSTEM RESEARCH INSTITUTE. **ArcGIS**. v.10.1 Redlands, 2012.
9. FAHNESTOCK, J. D.; SCHOWENGERDT, R. A. Spatially Variant Contrast Enhancement Using Local Range Modification. **Optical Engineering**, v. 22, p. 378–381, 1983.
10. FELÍCISIMO, A. M. Parametric statistical method for error detection in digital elevation models ISPRS. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 49, n. 4, p. 29-33, 1994.

11. HOWARD, A. Geomorphological systems – equilibrium and dynamics. **American Journal of Science**, v. 263, p. 302-312, 1965.
12. IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual técnico de geomorfologia**. 2ª ed., IBGE, Rio de Janeiro, 182 p, 2009.
13. LEINZ, V. e AMARAL, S. E. **Geologia Geral**. 13ª ed., Companhia Editora Nacional, São Paulo, 399p., 1998.
14. LIPORACI, S. R. **Mapeamento Geotécnico da Cidade e Parte do Município de Poços de Caldas-MG** - Escala 1:25.000, visando o Planejamento do Uso e Ocupação do Meio Físico. São Carlos, 1994. 212p. Vol. 1. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
15. MORAES, F. T.; JIMÉNEZ-RUEDA, J. R. Fisiografia da região do planalto de Poços de Caldas, MG/SP. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.38, n.1, p. 196-208, 2008.
16. MOREIRA, É. C., FERNANDES, L. A. D., PEREIRA, V. P. A Análise de Lineamentos Estruturais, Sob a Óptica da Geometria Fractal, no Maciço Alcalino de Poços de Caldas (MG). **Revista Pesquisas em Geociências**, v. 34, n 2, p. 89-97, 2007.
17. ONORATI, G.; POSCOLIERI, M.; VENTURA, R.; CHIARINI, V.; CRUCILLÀ, U. The Digital Elevation Model of Italy for Geomorphology and Structural Geology. **Catena**, v. 19, p. 147-178, 1992.
18. REUTER, H. I.; HENGL, T.; GESSLER, P.; SOILLE, P. Preparation of DEMs for Geomorphometric Analysis. In: HENGL, T. e REUTER, H. I. (Ed.). **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Amsterdam: Elsevier, v.33, 2008. 772p.
19. SILVA, J.E.B. & SANTOS, P.R.A. A utilização dos modelos SRTM na interpretação geomorfológica: técnicas e tecnologias aplicadas ao mapeamento geomorfológico do território brasileiro. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 4261-4266.
20. SMITH, M. J.; CLARK, C. D. Methods for the visualisation of digital elevation models for landform mapping. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 30, p. 885-900, 2005.
21. SOARES, P. C.; FIORI, A. P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 16, n. 32, p. 71-104, 1976.
22. TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. **Hydrological Processes**, v. 5, p. 81-100, 1991.
23. VALERIANO, M. M. Dados topográficos. In: FLORENZANO, T. G. (Org.). **Geomorfologia - conceitos e tecnologias atuais**. 1 ed. São Paulo: Oficina de textos, 2008, Cap. 3, p. 72-104.
24. WISE D. U., FUNICIELLO R., PAROTTO M., SALVINI F. Topographic lineament swarms: clues to their origin from domain analysis of Italy. **Geological Society of America Bulletin**, v. 96, p. 952-967, 1985.

Manuscrito recebido em: 11 de Dezembro de 2013

Revisado e Aceito em: 17 de Março de 2014

ANEXO B

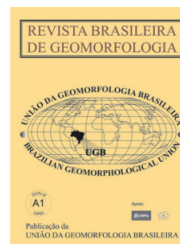
**ARTIGO PUBLICADO NA REVISTA BRASILEIRA DE GEOMORFOLOGIA, v. 15,
n. 3, p.353-370, 2014**



www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 15, nº 3 (2014)



APLICAÇÃO E AVALIAÇÃO DE METODOLOGIA DE CLASSIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DE PADRÕES DE FORMAS SEMELHANTES DO RELEVO

IMPLEMENTATION AND EVALUATION OF A METHODOLOGY FOR AUTOMATED CLASSIFICATION OF LANDFORM PATTERNS

Thaís Minatel Tinós

Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista.

Avenida 24 A, 1515, Rio Claro/SP, Cep: 13506-900, Brasil.

E-mail: thaistinos@gmail.com

Mateus Vidotti Ferreira

Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista.

Avenida 24 A, 1515, Rio Claro/SP, Cep: 13506-900, Brasil.

E-mail: mateusvidotti@yahoo.com.br

Paulina Setti Riedel

Departamento de Geologia Aplicada, Universidade Estadual Paulista.

Avenida 24 A, 1515, Rio Claro/SP, Cep: 13506-900, Brasil.

E-mail: psriedel@rc.unesp.br

José Eduardo Zaine

Departamento de Geologia Aplicada, Universidade Estadual Paulista.

Avenida 24 A, 1515, Rio Claro/SP, Cep: 13506-900, Brasil.

E-mail: jezaine@rc.unesp.br

Informações sobre o Artigo

Data de Recebimento:

12/09/2013

Data de Aprovação:

31/07/2014

Palavras-chave:

Geomorfometria; SRTM; Modelbuilder, Planalto de Poços de Caldas.

Keywords:

Geomorphometry; SRTM; Modelbuilder; Poços de Caldas Plateau.

Resumo:

Representar cartograficamente o relevo de maneira sistemática não é uma tarefa simples devido à complexidade das informações que devem ser necessariamente relatadas. O uso de processos interpretativos e subjetivos dificulta ainda mais a comparação e aplicação das metodologias por diferentes pesquisadores. Uma das formas de mudar esse quadro é substituir alguns desses processos por uma sequência de procedimentos quantitativos relativos à geomorfometria do terreno. O objetivo desse trabalho foi aplicar uma metodologia de classificação de formas do relevo proposta por Hammond (1954, 1964) e adaptada para o ambiente computacional por Dikau, Brabb e Mark (1991) e avaliar os resultados obtidos para a área do planalto de Poços de Caldas – MG. Os parâmetros considerados para a classificação foram declividade, amplitude e perfil do relevo, os quais foram calculados através de janelas móveis e somados para a geração de um mapa de formas de relevo seguindo uma legenda de intervalos de valores. Variados

tamanhos de janela móvel foram testados e a janela de 10X10 pixels apresentou os melhores resultados. No entanto, foi necessária ainda uma etapa de análise de contexto espacial para a elaboração do mapa final. Para a validação dos resultados, foi realizada uma análise estatística a partir da matriz de erro e do coeficiente de concordância Kappa. Apresenta-se como resultado um Mapa de Padrões de Formas Semelhantes do Relevo que abrange oito classes subdivididas entre terrenos planos, colinas, morros e montanhas. A metodologia aplicada se mostrou viável para área estudada na escala de 1:100.000, mas se concluiu que o tamanho da janela móvel é o ponto crítico dessa metodologia, pois ela determina quais formas do relevo serão integralmente ou parcialmente detectadas e quais formas serão suprimidas.

Abstract:

The cartographic representation of the relief is not a simple task due to the complexity of information to be reported. The subjective and interpretative processes involved make it difficult to compare and to apply methodologies carried by different researchers. This scenario can be altered if a sequence of quantitative procedures related to terrain geomorphometry is applied. The objective of this study was to implement a methodology for landform classification proposed by Hammond (1954, 1964) and adapted to the digital environment by Dikau, Brabb and Mark (1991) and evaluate the results obtained for the Poços de Caldas Plateau, Brazil. The following parameters were considered for the classification: flatness, local relief and profile, which were calculated through a moving window and summed to generate a landform map according to an interval legend. Various sizes of moving window were tested and the window of 10x10 pixels presented the best results. However, an analysis of the spatial context was necessary for the elaboration of the final map. Statistical analysis based upon Kappa statistics and error matrix were used to test the precision of the results. As a result, a Map of landform patterns comprising eight classes subdivided into flat land, low hills, high hills and mountains is presented. The methodology proved to be feasible for the area on the scale of 1:100,000, but it was concluded that the size of the moving window is the critical point of this methodology, as it determines whether a landform could be completely or partially detected or even suppressed.

1. Introdução

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 e VERSTAPPEN, 1988).

A cartografia geomorfológica constitui um importante instrumento na espacialização dos fatos geomorfológicos, permitindo representar as formas do relevo e suas relações com a estrutura e processos, bem como com a própria dinâmica dos processos, considerando suas particularidades (CASSETI, 2005).

No entanto, representar cartograficamente o relevo de maneira sistemática não é uma tarefa simples, devido à complexidade das informações que devem ser necessariamente relatadas. Muitas propostas surgiram ao longo das últimas décadas numa tentativa de sistematizar a classificação do relevo. Podem ser citadas as

contribuições de Veatch (1935), Fenneman (1938) e Hammond (1954, 1964), para os Estados Unidos; Christian (1958) e Speight (1974, 1990), para classificação de sistemas de relevo da Austrália; Solntsev (1962) para a ex-União Soviética; Verstappen e Van Zuidam (1968/1975) e Meijerink (1988) para o sistema de mapeamento geomorfológico do ITC/Holanda. No Brasil, destacam-se as propostas de classificação do relevo de Azevedo (1949), Ab'Saber (1967), Ross (1985), projeto RADAMBRASIL (BRASIL, 1983), os mapeamentos geomorfológicos do estado de São Paulo (IPT, 1981; ROSS; MOROZ, 1997) e por fim, o manual técnico de geomorfologia do IBGE (2009).

As propostas mais recentes de cartografia geomorfológica envolvem a análise digital do relevo a partir de modelos digitais de elevação (MDE) e automatização do processo de classificação. Esse movimento teve início quando Evans (1972) introduziu pela primeira vez um sistema integrado de geomorfometria, mas apenas nos últimos anos, com a evolução da capacidade de processamento dos computadores e difusão dos aplicativos de Sistemas de Informação Geográfica

(SIG) esses métodos se consolidaram. A partir de então a geomorfometria tem se estabelecido como um campo da ciência dedicado a analisar quantitativamente a superfície da terra (MACMILLAN; SHARY, 2008) e passou a fornecer ferramentas para os trabalhos de classificação automática do terreno.

Atualmente, os trabalhos de classificação automática do terreno estão bastante focados em aplicar técnicas de análise espacial e de imagens e modelos estatísticos. Podem-se destacar trabalhos que empregam a técnicas de OBIA (*Object Based Images Analysis*) e de árvore de decisão (BERTANI; ROSSETTI; ALBUQUERQUE, 2013; DRĂGUȚ; BLASCHKE, 2006; DRĂGUȚ; EISANK, 2011, 2012; VASCONCELOS *et al.*, 2012; VERHAGEN; DRĂGUȚ, 2012), lógica *Fuzzy* (ARRELL *et al.*, 2007; BURROUGH; VAN GAANS; MACMILLAN, 2000; SCHMIDT; HEWITT, 2004), redes neurais e redes Bayesianas (CARR, 1996; EHSANI; QUIEL, 2008), Geoestatística (BETTÚ, 2012; HENGL *et al.*, 2008), análise estatística multivariada (ADEDIRAN *et al.*, 2004; GHIMIRE, 2014) e outras formas de análise espacial utilizando Sistemas de Informação Geográfica (BOCCO; MENDOZA; VELAZQUEZ, 2001; BRABYN, 1996, 1998; DIKAU *et al.*, 1995; DIKAU; BRABB; MARK, 1991; JOSHI; MAURYA; CHAMYAL, 2013; KLINGSEISEN; METTERNICHT; PAULUS, 2008; METTERNICHT; KLINGSEISEN; PAULUS, 2005; STEINKE; SANO, 2011)

Dentre os trabalhos que buscaram sistematizar a classificação das formas do relevo, destacam-se os produzidos por Hammond (1954, 1964), que buscou substituir muitos dos processos interpretativos e subjetivos comuns à época, por uma sequência de procedimentos quantitativos relativos à geomorfometria do relevo. O autor almejava promover a objetividade na classificação das características do relevo e, com isso, garantir a comparabilidade dos resultados obtidos por diferentes pesquisadores.

Planejando mapear o relevo de grandes áreas e com poucos dados disponíveis, Hammond (1954, 1964) selecionou parâmetros que representassem satisfatoriamente a geometria do relevo e que pudessem ser facilmente calculados e divididos em classes. A partir da experiência adquirida em trabalhos anteriores e de um período de testes, os parâmetros utilizados pelo autor foram: declividade, amplitude e perfil de relevo, os quais eram calculados através de “quadrados de medição” e sobrepostos a dados derivados de cartas topográficas.

Dikau, Brabb e Mark (1991) adaptaram para o ambiente computacional o sistema de Hammond (1954, 1964), utilizando modelos digitais de elevação (MDE) e ferramentas disponíveis em Sistemas de Informação Geográfica. Esta adaptação reproduziu os procedimentos executados por Hammond (1964) e alcançou resultados comparáveis àqueles obtidos por meio de métodos analógicos tradicionais. Além disso, mostrou-se versátil, permitindo a melhoria e adaptação para áreas específicas. A partir do trabalho de Dikau, Brabb e Mark (1991), essa metodologia foi aplicada por diversos autores com pequenas modificações para a obtenção de resultados satisfatórios. Em âmbito internacional, destacam-se os trabalhos de Dikau *et al.* (1995), Brabyn (1996, 1998), Martínez-Zavala *et al.* (2005), Morgan e Lesh (2005), Martínez-Zavala *et al.* (2007). No entanto, ainda não há registros de publicações com a aplicação dessa classificação em território brasileiro.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho é aplicar a metodologia de classificação das formas de relevo proposta por Hammond (1954, 1964) e adaptada por Dikau, Brabb e Mark (1991), utilizando um MDE derivado de dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e avaliar os resultados obtidos para a área do planalto de Poços de Caldas – MG. A área foi escolhida devido ao relevo com grandes contrastes, feições bem marcadas, além da disponibilidade de dados e conhecimento prévio dos autores.

2. Área De Estudo

A área de estudo abrange a região do planalto de Poços de Caldas, localizado entre os limites dos Estados de São Paulo e Minas Gerais, no divisor de águas entre os rios Grande, Pardo e Moji-Guaçu. A área se destaca por apresentar um relevo contrastante, que vem evoluindo a partir de uma superfície de erosão que nivela seus topos em altitudes compreendidas entre 1400 a 1600m (PONÇANO *et al.*, 1981).

O planalto de Poços de Caldas localiza-se na borda ocidental da província da Mantiqueira e em contato com os extremos orientais da bacia sedimentar do Paraná, formando um conjunto morfoestrutural perfeitamente caracterizado (CHRISTOFOLETTI, 1973). Com cerca de 800 km², o planalto é moldurado por um dique anelar composto por serras e uma zona rebaixada no interior. Este dique anelar está salientado de 500 a 1000 m acima do relevo cristalino que o rodeia e é composto predo-

minantemente por rochas alcalinas (principalmente foiaítos e tinguaítos). Seus topos alcançam 1.637m na Serra de São Domingos, enquanto o interior se nivela em torno de 1.300 m.

Dentre as feições geomorfológicas da região Sudeste do Brasil, o planalto de Poços de Caldas situa-se na província geomorfológica do Planalto Atlântico e na zona do planalto Sul de Minas, como pode ser ob-

servado na Figura 1. Essa zona é subdividida em três subzonas: a superfície do Alto Rio Grande, o planalto de São Pedro de Caldas e o próprio planalto de Poços de Caldas. Ao norte e oeste do planalto ocorre também a zona Cristalina do Norte, que mantém um relevo de transição entre as terras altas do planalto do Sul de Minas e da Mantiqueira para a região rebaixada da Depressão Periférica paulista (BRASIL, 1979).

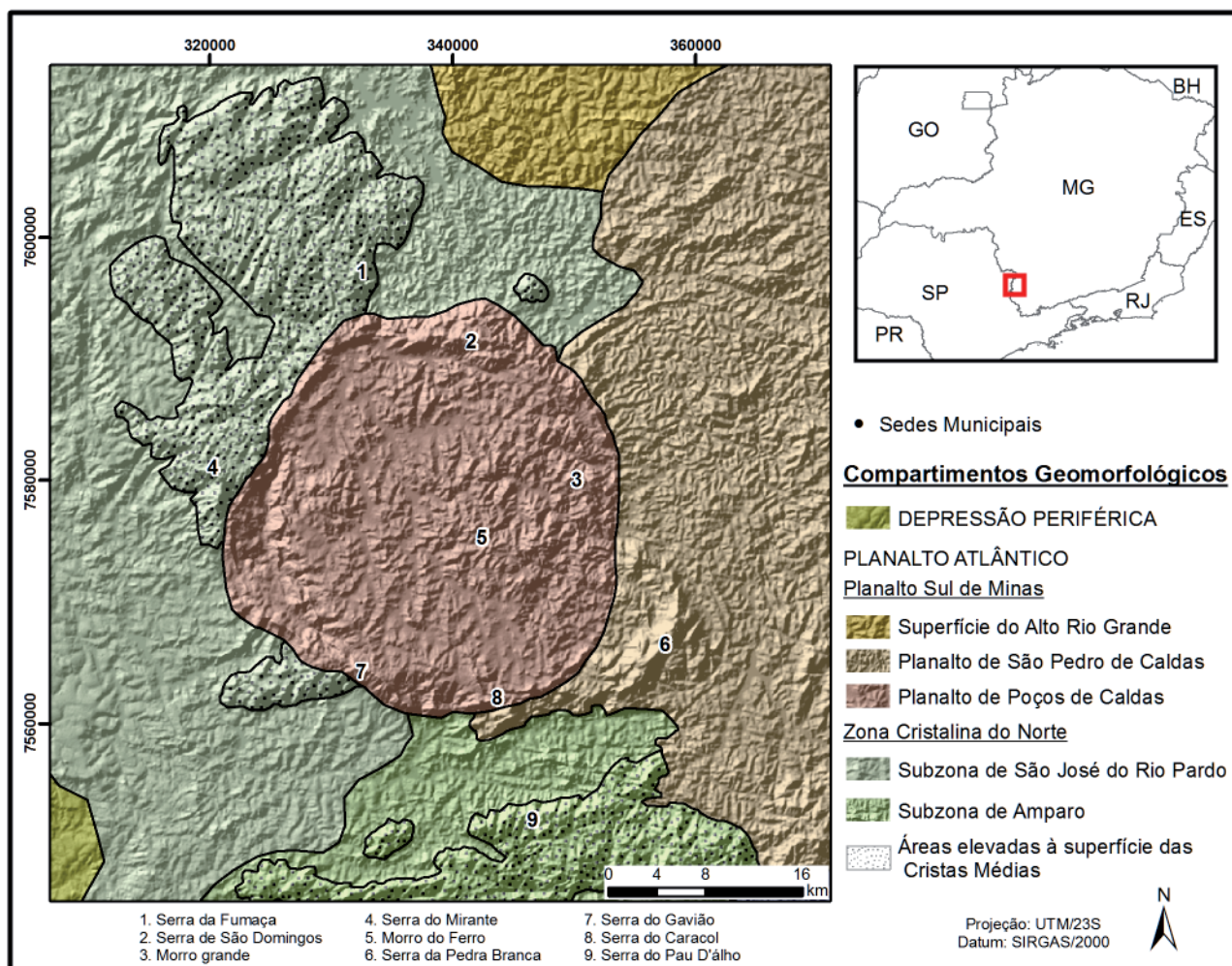


Figura 1 - Localização da área de estudo em relevo sombreado. Compartimentos geomorfológicos modificados de Brasil (1979).

No contexto geológico, a área é denominada de Maciço Alcalino de Poços de Caldas. Christofoletti (1973) afirma que o maciço alcalino, de idade cretácea, formou-se a partir de um complexo de rochas efusivas e principalmente intrusivas, originadas de um processo de vulcanismo. A intrusão ocorreu em domínios do embasamento cristalino, sendo o maciço cercado por granitos, gnaisses e migmatitos pré-cambrianos de alto grau metamórfico, policíclicas e polideformadas, pertencentes ao Maciço de Guaxupé.

Ellert (1959) destaca a ocorrência de quatro tipos litológicos no interior do maciço: 1 - rochas efusivas e hipoabissais (tinguaítos e fonólitos), 2 - rochas plutônicas (nefelina sienitos, lujaunitos e chibinitos), 3 - brechas, tufos e conglomerados e 4 - rochas potássicas (associadas a processos metassomáticos). O maciço ainda se destaca pelo intenso fraturamento e pela hidrografia fortemente controlada pela litologia e pelo sistema de fraturas.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Aquisição dos dados e construção da ferramenta

Neste trabalho, os dados SRTM, de aproximadamente 90 metros de resolução, foram utilizados como base para o modelo digital de elevação do terreno. Os dados foram adquiridos no site <http://glcf.umd.edu/>, onde são oferecidas 3 versões do SRTM com diferentes processamentos. Recomenda-se a opção “*Finished filled*”, pois nessa, algumas falhas de imageamento foram corrigidas. De acordo com os trabalhos de Medeiros, Ferreira e Ferreira (2008), Martins (2010) e Bias (2011) que avaliaram o padrão de exatidão cartográfica (PEC) dos dados SRTM em diferentes regiões do Brasil, esse dado é compatível com a escala 1:100.000, sendo PEC classe A. Dessa forma, pode-se afirmar que o produto final gerado é compatível com essa escala.

Para reproduzir os passos propostos por Dikau, Brabb e Mark (1991), foi utilizado o software ArcGIS 10.1 (ESRI, 2011) e as seguintes ferramentas foram combinadas através da interface do *Modelbuilder*: *Slope*, *Reclassify*, *Focal Statistic*, *Raster Calculator*, *Majority Filter*, *Region Group*, *Nibble* e *Raster to Polygon*. Todos os detalhes da configuração da ferramenta criada e o seu download para outros usuários estão disponíveis no seguinte link: <http://sdrv.ms/14IF3iZ>.

3.2. Teste das janelas móveis e cálculo dos parâmetros

A metodologia de classificação do relevo baseia-se em uma janela móvel, que tem tamanho variável, de acordo com a escala de trabalho e as formas de relevo a serem mapeadas. Essa etapa consistiu em testar janelas de 5X5, 10X10, 15X15, 20X20, 30X30 e 40X40 pixels para o cálculo dos parâmetros Declividade, Amplitude e Perfil do Relevo, conforme proposto por Hammond (1954):

O cálculo do parâmetro de Declividade foi realizado a partir dos dados derivados do SRTM. Foi gerado um mapa de declividade com duas classes, sendo classe 1 ($\text{dec} < 8\%$) e classe 2 ($\text{dec} > 8\%$). Em seguida, foi calculada para cada pixel a porcentagem de declividade suave ($\text{dec} < 8\%$) em seu entorno, por meio da janela móvel. Dessa forma, o parâmetro de declividade representa a porcentagem de declividade suave dentro de um raio de busca (HAMMOND, 1954). O mapa de porcentagem de declividade suave foi classificado em 4 classes, de acordo com a Tabela 1 e é apresentado na Figura 2A.

Tabela 1: Classes do parâmetro de Declividade propostas por Hammond (1954) e adaptadas por Dikau, Brabb e Mark (1991).

Classes	Intervalo de quantidade de declividade suave (em %)	Valor reclassificado
Classe 1	0 – 20	100
Classe 2	20 – 50	200
Classe 3	50 – 80	300
Classe 4	80 – 100	400

Para o parâmetro de Amplitude local do terreno, também chamado de Relevo Local por Hammond (1954, 1964) foram calculados para cada pixel os valores mínimo e máximo de elevação dentro da janela móvel. Em seguida, realizou-se a subtração do mínimo em relação ao máximo. O produto então foi reclassificado em 6 classes, de acordo com a Tabela 2. A Figura 2B apresenta o mapa resultante desse processamento.

Tabela 2: Classes do parâmetro Amplitude (relevo local) propostas por Hammond (1954) e adaptadas por Dikau, Brabb e Mark (1991).

Classes	Intervalo de amplitude (em metros)	Valor reclassificado
Classe 1	0 - 30	10
Classe 2	30 - 90	20
Classe 3	90 - 150	30
Classe 4	150 - 300	40
Classe 5	300 - 900	50
Classe 6	900 - 9999	60

Para o cálculo do parâmetro de Perfil do Relevo foi necessário inicialmente encontrar os terrenos altos e baixos. Terrenos altos são definidos como áreas em que a máxima elevação dentro da janela móvel, menos a elevação do ponto central da janela é menor que metade da Amplitude (relevo local). Terrenos baixos são definidos como áreas em que a máxima elevação dentro da janela, menos a elevação do ponto central da janela é maior que metade da Amplitude (relevo local) (HAMMOND,

1954). Em seguida, foi calculada a porcentagem de declividade suave ($\text{dec} < 8\%$) no interior dos terrenos altos e baixos. A Tabela 3 apresenta as classes de perfil de relevo propostas por Hammond (1954) e o mapa de perfil do relevo é mostrado na Figura 2C.

Tabela 3: Classes do parâmetro Perfil do Relevo propostas por Hammond (1954) e adaptadas por Dikau, Brabb e Mark (1991).

Classes	Descrição da classe de perfil	Valor
Classe 1	Terrenos baixos com mais de 75% da área com declividade suave.	1
Classe 2	Terrenos baixos com menos de 75% da área com declividade suave.	2
Classe 3	Terrenos altos com mais de 75% da área com declividade suave.	3
Classe 4	Terrenos altos com menos de 75% da área com declividade suave.	4

3.3. Elaboração do Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo.

Os parâmetros de declividade, amplitude local e perfil do relevo foram somados para gerar mapas de padrões de formas semelhantes do relevo para os vários tamanhos de janela móvel testados. As classes foram definidas a partir da legenda proposta por Dikau, Brabb e Mark (1991), apresentada na Tabela 4, com uma coluna adicional contendo uma proposta de tradução. Optou-se por manter fidelidade à nomenclatura utilizada em inglês, no entanto, algumas palavras foram modificadas por existirem termos mais específicos em português.

As classes identificadas se enquadram, segundo a ordem taxonômica de Ross (1990), no 3º Táxon - Unidades Morfológicas ou Padrões de Formas Semelhantes, ou seja, se definem por conjuntos de tipologias de formas que guardam entre si elevado grau de semelhança, quanto ao tamanho de cada forma e o aspecto fisionômico.

Os valores gerados no mapa de Hammond (1954, 1964) representam códigos de cada classe e podem ser interpretados de acordo com a Figura 3.

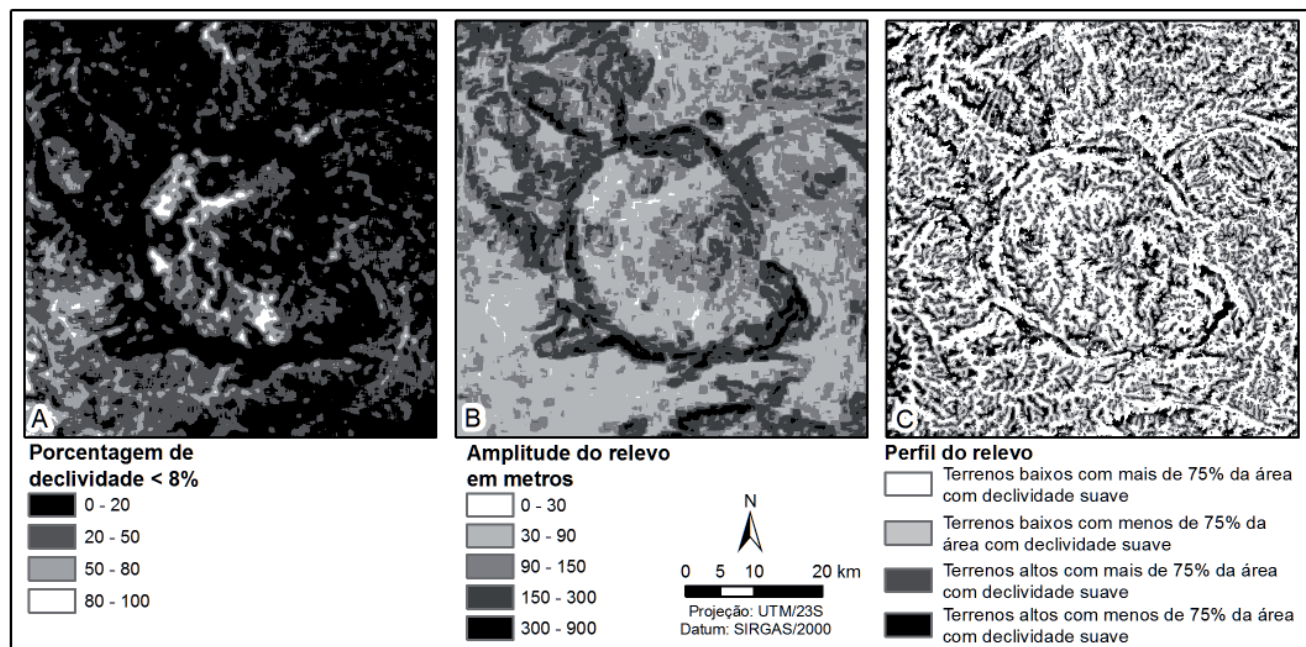


Figura 2 - Representação dos parâmetros calculados. A - Declividade, B - Amplitude (relevo local), C - Perfil de Relevo.

Tabela 4: Legenda para classificação do relevo proposta por Dikau, Brabb e Mark (1991).

Intervalos de valores - Mapa Hammond (1954, 1964)	Classes propostas por Dikau, Brabb e Mark (1991)	Tradução sugerida
411-414	Flat or nearly flat plains	Terrenos planos ou quase planos
421-424	Smooth plains with some local relief	Terrenos planos suavizados com algum relevo local
311-314	Irregular plains with low relief	Terrenos planos irregulares com relevo baixo
321-324	Irregular plains with moderate relief	Terrenos planos com relevo moderado
433-434, 333-334	Tablelands with moderate relief	Tabuleiros com relevo moderado
443-444, 343-344	Tablelands with considerable relief	Tabuleiros com relevo considerável
453-454, 353-354	Tablelands with high relief	Tabuleiros com relevo alto
463-464, 363-364	Tablelands with very high relief	Tabuleiros com relevo muito alto
431-432, 331-332	Plains with hills	Terrenos planos com colinas
441-442, 341-342	Plains with high hills	Terrenos planos com morros
451-452, 351-352	Plains with low mountains	Terrenos planos com montanhas baixas
461-462, 361-362	Plains with high mountains	Terrenos planos com montanhas altas
211-214	Open very low hills	Colinas baixas suavizadas
221-224	Open low hills	Colinas altas suavizadas
231-234	Open moderate hills	Morros baixos suavizados
241-244	Open high hills	Morros altos suavizados
251-254	Open low mountains	Montanhas baixas suavizadas
261-264	Open high mountains	Montanhas altas suavizadas
111-114	Very low hills	Colinas baixas
121-124	Low hills	Colinas altas
131-134	Moderate hills	Morros baixos
141-144	High hills	Morros altos
151-154	Low mountains	Montanhas baixas
161-164	High mountains	Montanhas altas

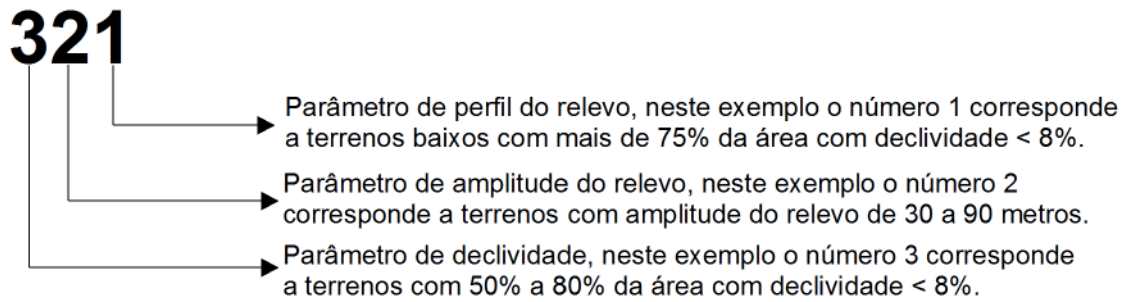


Figura 3 - Exemplo de interpretação dos valores gerados.

3.4. Validação dos resultados

A matriz de erro ou matriz de confusão e o coeficiente de concordância Kappa têm sido reconhecidos como as mais importantes técnicas de estimativa da exatidão da classificação de dados de sensores remotos. A matriz de erro é uma das formas mais eficientes de validação de uma classificação, pois permite também calcular outras medidas de exatidão, como a acurácia do usuário e a acurácia do produtor. A acurácia do usuário está relacionada aos erros de inclusão ou comissão, ou seja, pontos atribuídos a uma determinada classe oriundos de erros de classificação das outras classes. Já a acurácia do produtor considera os erros de exclusão ou omissão, ou seja, refere-se à probabilidade de determinada classe ter sido corretamente classificada de acordo com os dados de referência (CONGALTON e GREEN, 2009).

Para a elaboração da matriz de erro e cálculo do coeficiente de concordância Kappa, foram obtidos 300 pontos amostrais dentro do limite da área de estudo, utilizando-se como método a amostragem estratificada aleatória. Os pontos amostrais, visualizados na Figura 4, foram obtidos em duas fases:

- Inicialmente foi realizado um trabalho de campo para a verificação e avaliação das classificações geradas. Devido à dificuldade em se reconhecer e diferenciar visualmente em campo todas as classes propostas na legenda de Dikau, Brabb e Mark (1991), optou-se por reuni-las, em um primeiro momento, em grupos representativos das classes de formas de relevo para a validação dos resultados. Assim, diferentes classes de relevo colinoso, por exemplo, foram reunidas em um só grupo denominado de colinas. Foram obtidos 61 pontos amostrais no trabalho de campo, abrangendo todos os grupos representativos das formas de relevo;

- Em escritório, foram adquiridos 239 pontos adicionais. Para tal, efetuou-se uma análise e identificação dos grupos de classes a partir dos seguintes materiais: cartas topográficas (curvas de nível e drenagem) na escala 1:50.000 (IBGE), imagem SPOT com resolução de 2,5m e o modelo digital de elevação derivado do SRTM. Buscou-se complementar os pontos obtidos em campo com o objetivo de totalizar o mínimo de 50 pontos por grupo de classes, conforme sugerido por Congalton e Green (2009) para o tamanho da área de estudo e pelo número de classes do mapa.

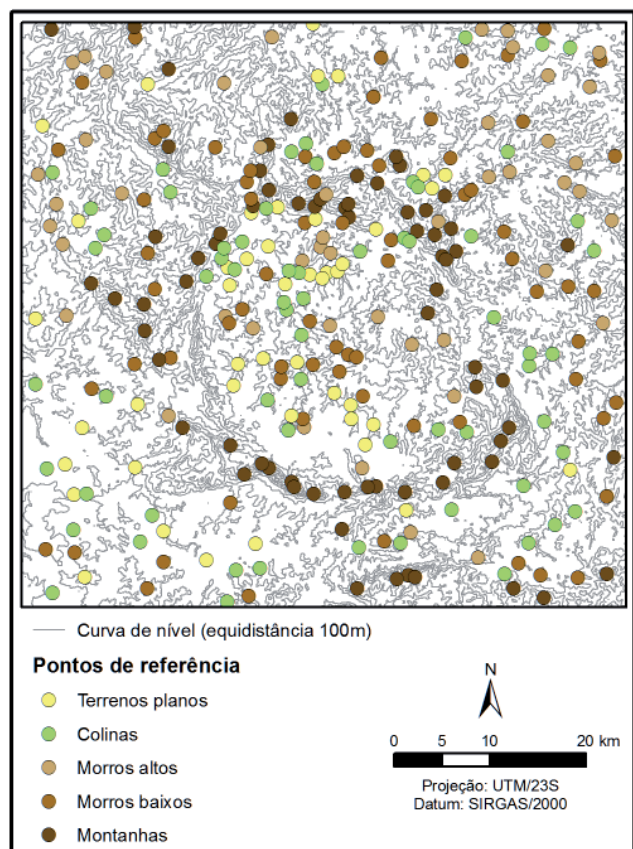


Figura 4 - Pontos amostrais obtidos em trabalho de campo e escritório.

Os pontos obtidos em campo e escritório, tidos como dados de referência para a validação (CONGALTON e GREEN, 2009), foram confrontados com os resultados das classificações efetuadas para todas as janelas móveis e, em seguida, a matriz de erro foi elaborada e o cálculo do coeficiente Kappa foi realizado. Após a validação estatística e a definição da janela móvel mais adequada, foi produzido o mapa final de padrões de formas semelhantes do relevo.

4. Resultados

4.1. Seleção da janela móvel

Dezenove classes propostas na legenda de Dikau, Brabb e Mark (1991) foram identificadas na classificação do relevo efetuada nos vários os tamanhos de janela móvel testados. Como já explicitado, para a validação dos resultados, essas classes foram reunidas em grupos representativos das classes, conforme mostra a Tabela 5. As classes de tabuleiro foram consideradas uma exceção, visto que a área das três classes somadas não ultrapassou 1% da área total mapeada em nenhuma

das janelas testadas. Assim, optou-se por agrupá-las ao conjunto com características de maior similitude, ou seja, aos terrenos planos.

A Figura 5 apresenta o resultado da classificação do relevo para todos os tamanhos de janela móvel testados e a Tabela 6 mostra o acerto geral, o coeficiente de concordância Kappa e as categorias de concordância Kappa, segundo Landis e Koch (1977).

Observando a Figura 5, percebe-se que o tamanho da janela móvel foi determinante no mapeamento integral ou parcial das formas de relevo. Através desse teste observou-se que quando se aumentava a janela (Ex: 30X30, 40X40) havia uma generalização das Montanhas e Morros altos, os quais eram claramente superestimados, enquanto os Terrenos planos e Colinas eram, em sua maioria, suprimidos. O inverso ocorreu no teste da janela móvel de 5X5 pixels. Terrenos planos e Colinas foram superestimados, enquanto os Morros baixos e Morros altos foram parcialmente identificados e as Montanhas foram totalmente suprimidas.

A partir da Tabela 6, nota-se que a janela móvel de 10X10 pixels apresentou o maior valor de acerto

Tabela 5: Agrupamento das classes em conjuntos representativos das formas de relevo

Classes		Grupos
Terrenos planos ou quase planos Terrenos planos suavizados com algum relevo local Terrenos planos irregulares com relevo baixo Terrenos planos irregulares com relevo moderado Terrenos planos com colinas Terrenos planos com morros Terrenos planos com montanhas baixas Tabuleiro com relevo moderado Tabuleiro com relevo considerável Tabuleiro com relevo alto	→	Terrenos planos
Colinas baixas suavizadas Colinas altas suavizadas Colinas altas	→	Colinas
Morros baixos suavizados Morros baixos	→	Morros Baixos
Morros altos suavizados Morros altos	→	Morros Altos
Montanhas baixas suavizadas Montanhas baixas	→	Montanhas

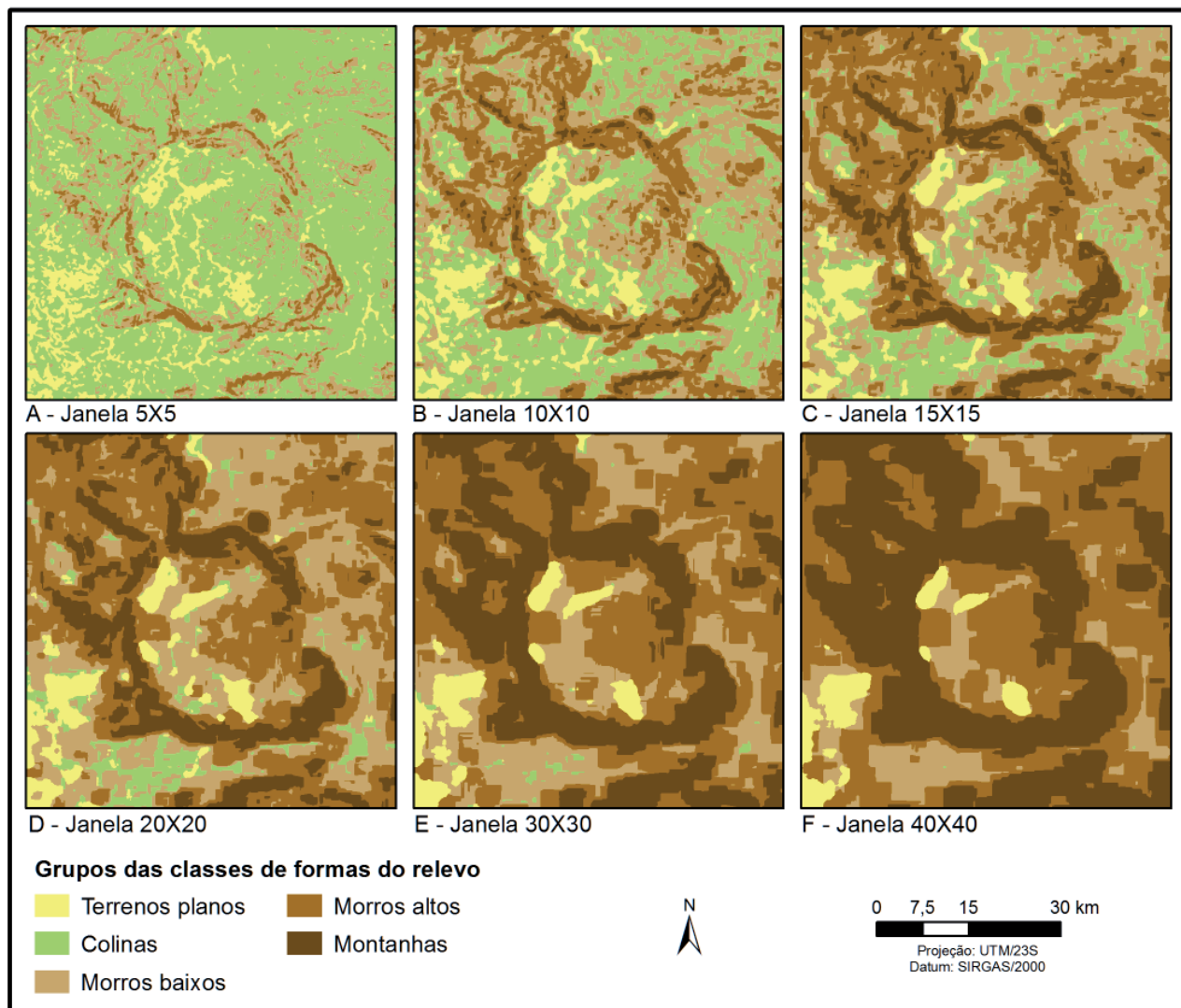


Figura 5 - Resultados obtidos com os diferentes tamanhos de janela móvel testados.

Tabela 6: Acerto geral, coeficiente de concordância Kappa e categorias de concordância Kappa, segundo Landis e Koch (1977) para todos os tamanhos de janela móvel testados.

Janelas móveis testadas	Acerto geral	Coeficiente de concordância Kappa	Categorias de concordância Kappa (Landis e Koch, 1977)
Janela 5X5	35.67%	0,19	Fraca
Janela 10X10	69.0%	0,61	Forte
Janela 15X15	62.0%	0,52	Moderada
Janela 20X20	55.33%	0,44	Moderada
Janela 30X30	47.33%	0,34	Razoável
Janela 40x40	39.67%	0,24	Razoável

geral - 69%, e do coeficiente de concordância Kappa - 0,61%. Estes índices, de acordo com a categorização proposta por Landis e Koch (1977), indicam uma forte concordância com os dados de referência, o que representa uma substancial precisão na classificação dos grupos representativos das classes de formas de relevo. Mediante os resultados dessa análise estatística, a janela móvel de 10X10 pixels foi selecionada para a elaboração do mapa final.

4.2. Elaboração do mapa final de padrões de formas semelhantes do relevo

Quatorze classes foram identificadas na área com a janela de 10X10 pixels, sendo que 3 delas (Morros baixos, Morros altos e Colinas altas suavizadas) correspondem a mais de 75% da área total, como pode ser observado na Figura 6. A Tabela 7 apresenta as classes de padrões de formas semelhantes do relevo geradas com suas respectivas áreas e porcentagens de ocorrência.

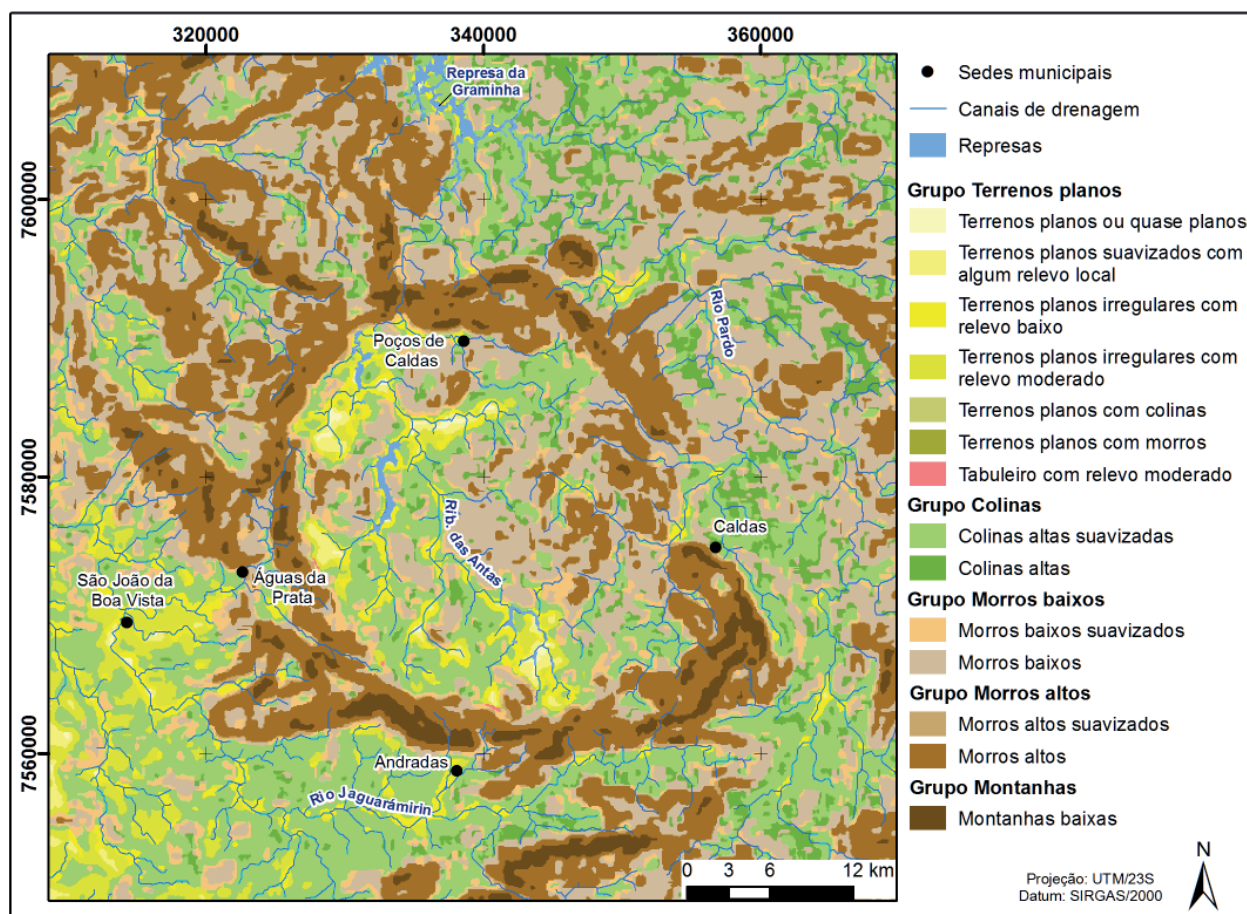


Figura 6 - Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo resultante da janela de 10X10 pixels.

Uma reclassificação foi realizada para classes geradas com áreas de ocorrência menores que 1% da área total mapeada, ou seja, com pouca representatividade espacial. Assim, essas classes foram reclassificadas para classes com características semelhantes, conforme mostra a Tabela 8.

Observou-se também que o tamanho da janela móvel de 10X10 pixels, apesar de um bom desempenho estatístico para os grupos de classes, compartimentou algumas formas de relevo de maior dimensão, como

pode ser observado na Figura 6. Na área de estudo, esse problema ocorreu principalmente com o relevo montanhoso do dique anelar que circunda o Planalto de Poços de Caldas. A janela selecionada não englobou a montanha em sua totalidade e acabou por dividi-la em três classes, sendo Morros baixos suavizados na baixa vertente, Morros Altos em grande parte da vertente e Montanhas Baixas, em apenas pequenos polígonos no topo. Com o objetivo de minimizar esse problema, foi realizada uma análise espacial para a reclassificação dos

Tabela 7: Classes de padrões de formas semelhantes do relevo geradas e respectivas áreas de ocorrência.

Classes	Área (km ²)	Área (%)
Terrenos planos com morros	0.10	< 0.01
Tabuleiros com relevo moderado	0.46	0.01
Terrenos planos com colinas	2.75	0.07
Terrenos planos ou quase planos	5.49	0.15
Morros altos suavizados	15.89	0.42
Terrenos planos suavizados com algum relevo local	29.39	0.79
Montanhas baixas	97.77	2.61
Terrenos planos irregulares com relevo moderado	119.89	3.20
Terrenos planos irregulares com relevo baixo	130.58	3.49
Colinas altas	223.91	5.98
Morros baixos suavizados	273.77	7.31
Colinas altas suavizadas	825.69	22.06
Morros altos	944.02	25.22
Morros baixos	1073.85	28.69

polígonos referentes ao relevo montanhoso. As áreas classificadas como Morros baixos e Morros baixos suavizados, que contivessem polígonos de Montanhas Baixas, foram reclassificadas como Montanhas baixas. A Figura 7 apresenta o mapa de padrões de formas semelhantes do relevo, resultante da janela de 10X10 pixels, após as reclassificações.

Esse mapa foi igualmente validado a partir dos dados de referência. Houve uma melhora significativa do acerto geral, que passou a ser de 82,33% e do coeficiente de concordância Kappa, que subiu para 0,77. De acordo com a categorização proposta por Landis e Koch (1977), o valor de coeficiente de concordância Kappa atingido continua indicando uma forte concordância na classificação dos grupos representativos das classes de formas de relevo. A Tabela 9 mostra a matriz de erro, o acerto geral e o coeficiente de concordância Kappa para o mapa de padrões de formas semelhantes do relevo após a etapa de reclassificação e a Tabela 10 apresenta a acurácia do usuário e a acurácia de produção para cada um dos grupos de classe de formas semelhantes do relevo.

A partir das Tabelas 9 e 10 é possível observar que o grupo de Terrenos planos destaca-se com o melhor desempenho na classificação, pois apresentou o valor mais alto de acurácia de produção (97,14%) e o segundo maior valor de acurácia do usuário (89,47%). Esses valores sugerem que a janela de 10X10 pixels foi ideal para a delimitação desse grupo. O grupo de Montanhas também apresentou um bom desempenho na classificação, tendo o segundo maior valor de acurácia de produção (93,33%) e um valor intermediário de

Tabela 8: Reclassificação das classes com áreas menores que 1% da área total mapeada.

Classe original		Após reclassificação
Terrenos planos com morros	→	Terrenos planos irregulares com relevo moderado
Tabuleiros com relevo moderado	→	Terrenos planos irregulares com relevo moderado
Terrenos planos com colinas	→	Terrenos planos irregulares com relevo moderado
Terrenos planos ou quase planos	→	Terrenos planos irregulares com relevo baixo
Morros altos suavizados	→	Morros altos
Terrenos planos suavizados com algum relevo local	→	Terrenos planos irregulares com relevo baixo

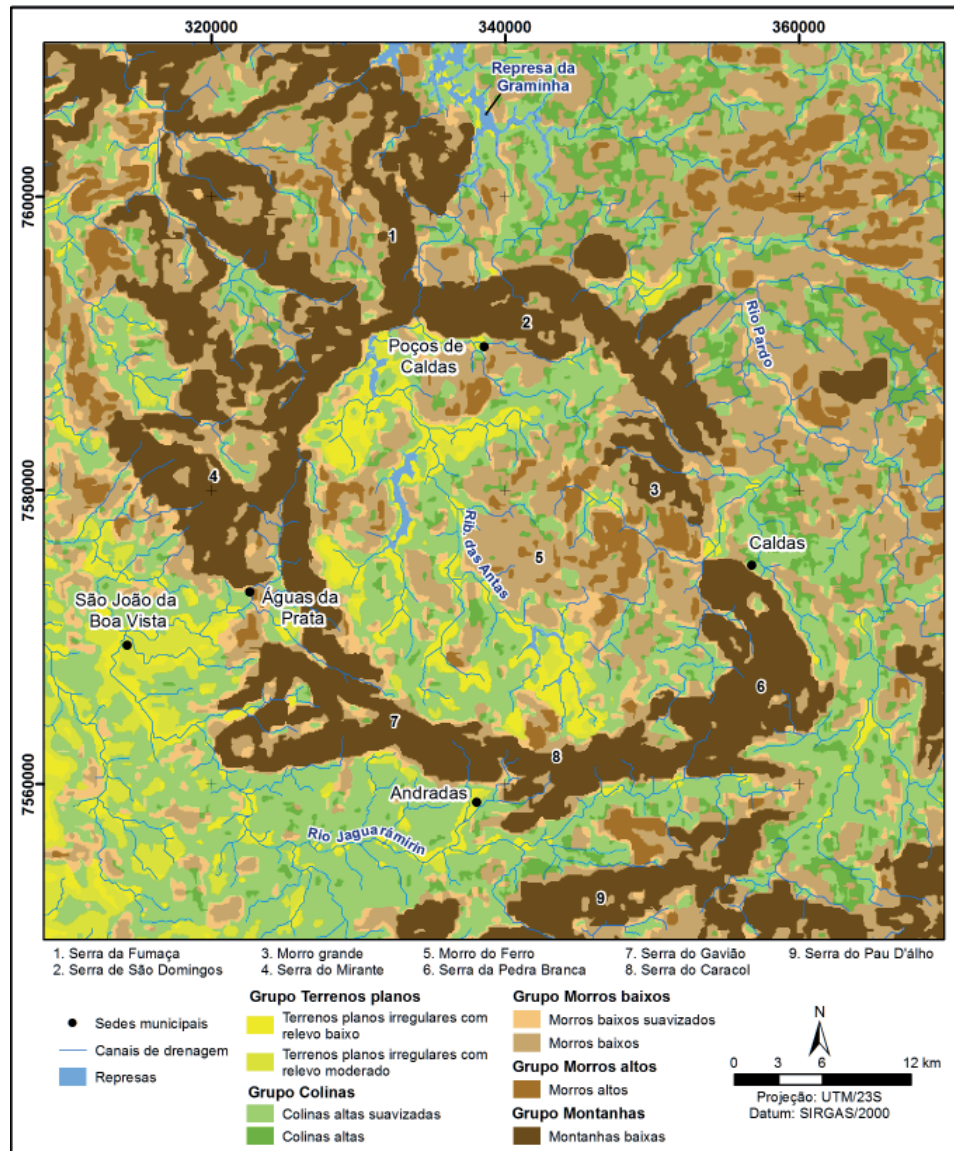


Figura 7 - Mapa de padrões de formas semelhantes do relevo, após a etapa de reclassificação.

Tabela 9: Matriz de erro e o coeficiente de concordância Kappa para o mapa de padrões de formas semelhantes do relevo após a etapa de reclassificação.

Dado Classificado	Dado de Referência					Total
	Terrenos planos	Colinas	Morros baixos	Morros altos	Montanhas	
Terrenos planos	42	9	0	0	0	51
Colinas	3	48	12	1	0	64
Morros baixos	0	8	57	9	2	76
Morros altos	0	0	1	32	0	33
Montanhas	0	0	3	5	68	76
Total	45	65	73	47	70	300
						Acerto geral=82,33%
						Kappa=0,77

Tabela 10: Acurácia do usuário e a acurácia de produção para o mapa de padrões de formas semelhantes do relevo após a etapa de reclassificação.

Grupos de classe	Acurácia do usuário	Acurácia de produção
Terrenos planos	89,47%	97,14%
Colinas	75,00%	73,85%
Morros baixos	75,00%	78,08%
Morros altos	96,97%	68,09%
Montanhas	82,35%	93,33%

acurácia do usuário (82,35%). No entanto, esses valores só foram alcançados após a etapa de reclassificação.

Os grupos de Colinas e Morros baixos concentraram os menores valores de acurácia do usuário (75%), o que significa que há maior probabilidade de serem confundidos com outros grupos. Esse pode ser um indicativo de que essas classes podem ter sido superestimadas na classificação automática. Já os Morros altos apresentaram o pior valor de acurácia de produção, mas o maior valor para acurácia do usuário, o que significa que há 68,09% de chance desse grupo ser classificado corretamente e 96,97% de probabilidade de não ser confundido com outras classes. No processo de reclassificação, esse grupo perdeu grande quantidade de área para o grupo Montanhas e, conseqüentemente, pode ter tido sua área subestimada no mapa final.

Além da validação estatística, foi realizada uma análise comparativa com outros estudos e mapeamentos produzidos na área. O relevo montanhoso, correspondente ao dique anelar que circunda o planalto de Poços de Caldas, e seu interior, com topografia menos movimentada, declividades mais suaves e predomínio dos grupos Colinas e Morros baixos, foram mapeados e/ou descritos por Christofolletti (1973), Brasil (1979), IPT (1981), Leonardi (2007), Moraes e Jiménez-Rueda (2008), Tinós (2011) e Zaine (2011). A área de relevo mais movimentado na porção leste do interior planaltino, onde foram identificadas as classes de Morros baixos, Morros altos e Montanhas baixas, foi mapeada por Leonardi (2007) e relatada por Christofolletti (1972) como uma região com maiores diferenças altimétricas (entre o topo e a base) e declividades mais acentuadas, onde estão localizados o Morro Grande e o Morro do Ferro.

A noroeste e ao sul da área, observou-se que as áreas elevadas pertencentes à Zona Cristalina do Norte (BRASIL, 1979), onde se localizam as Serra da Fu-

maça, Serra do Mirante e Serra do Pau D'alto, foram identificadas satisfatoriamente como Montanhas Baixas, circunvizinhas a Morros baixos e Morros altos. Essas classes correspondem à descrição de Brasil (1979) e IPT (1981), de um relevo movimentado de escarpas e mar de morros, sobretudo a noroeste de Poços de Caldas. A sudoeste a topografia aparece bem menos movimentada, com as classes Terrenos planos e Colinas altas suavizadas marcando a transição do Planalto Sul de Minas para a Depressão Periférica Paulista. Segundo Brasil (1979), IPT (1981) e Moraes e Jiménez-Rueda (2008) essa área é caracterizada pelo predomínio de colinas e morrotes com altitudes que se nivelam àquelas da Depressão Periférica, pelas declividades suaves, dissecação de baixa a moderada e amplitude local com pouca variação.

O nordeste e leste da área de estudo abrangem a região classificada por Brasil (1979) de Planalto Sul de Minas. Segundo os autores, ocorre uma ampla superfície de relevo ondulado a leste da Represa da Graminha (extremo norte da área), classificada no mapa como Colinas altas suavizadas, Colinas altas e Morros baixos. Nas imediações do Rio Pardo, essa área evolui para um relevo mais movimentado, com diferenças altimétricas maiores e declividades mais acentuadas, onde ocorrem predominantemente as classes de Morros baixos e Morros altos. Esses morros se estendem por toda a borda leste do planalto de Poços de Caldas, onde novamente o relevo se suaviza e a classe de Colinas altas suavizadas volta a predominar. Zaine (2011) descreveu e mapeou nessa área um relevo de morros e morrotes em forma de “meia laranja” sustentados por gnaisses e migmatitos, com predomínio de encostas suavizadas, o que se assemelha às classes identificadas no mapa.

Após essa análise comparativa com outros estudos e mapeamentos produzidos na área, observou-se que o mapa final de padrões de formas semelhantes do relevo, produzido nesse trabalho, mostrou-se concordante com

muitas das descrições já realizadas. De modo geral, as classes identificadas correspondem ao tipo de forma do relevo e respectivas áreas de ocorrência relatadas por outros pesquisadores.

5. Conclusão e Recomendações

A metodologia de classificação das formas de relevo, proposta por Hammond (1954, 1964) e aprimorada por Dikau, Brabb e Mark (1991), mostrou-se bastante viável para aplicação na região do planalto de Poços de Caldas, no entanto, alguns fatores precisam ser considerados.

Quanto aos parâmetros de classificação propostos por Hammond (1954, 1964) – declividade, amplitude (relevo local) e perfil do relevo – nota-se, através da Tabela 4, que o perfil do relevo tem pouca influência, sendo considerado apenas na diferenciação entre Tabuleiros e Terrenos planos. Assim, o parâmetro perfil do relevo praticamente não exerceu influência sobre o resultado obtido para a área do planalto de Poços de Caldas, visto que as classes de tabuleiros não apresentaram áreas significativas na região. Sugere-se para um estudo futuro uma investigação mais aprofundada sobre esse parâmetro, especificamente sobre sua escala de detalhe e função nessa metodologia.

Mas o ponto crítico observado nessa proposta de classificação do relevo está relacionado ao tamanho da janela móvel, pois ele determina quais formas do relevo serão integralmente ou parcialmente detectadas e quais formas serão suprimidas. Apesar da janela de 10X10 pixels ter apresentado um melhor resultado estatístico, conclui-se que não existe um tamanho de janela ideal para todas as formas. Melhores resultados seriam alcançados se fosse possível utilizar uma janela móvel específica para cada grupo ou classe de formas do relevo. A medida da janela deve ser testada de acordo com o relevo de cada área, a escala de trabalho escolhida e as formas que se tenha mais interesse em classificar. Nesse trabalho, ressalta-se que a aplicação da análise de contexto espacial complementar à metodologia de classificação foi essencial para superar as limitações encontradas com o tamanho da janela móvel.

Agradecimentos

À CAPES e ao CNPq pelas bolsas de doutorado concedidas.

Referências

- AB'SABER, A. N. Domínios morfoclimáticos e províncias fitogeográficas do Brasil. **Orientação São Paulo**, n. 3, p. 45-48, 1967.
- ADEDIRAN, A. O; PARCHARIDIS, I.; POSCOLIERI, M.; PAVLOPOULOS, K. Computer-assisted discrimination of morphological units on north-central Crete (Greece) by applying multivariate statistics to local relief gradients. **Geomorphology**, v. 58, n. 1-4, p. 357-370, 2004. ISSN 0169-555X.
- ARRELL, K. E.; FISHER, P. F.; TATE, N. J.; BASTIN, L. A fuzzy c-means classification of elevation derivatives to extract the morphometric classification of landforms in Snowdonia, Wales. **Computers & Geosciences**, v. 33, n. 10, p. 1366-1381, 2007. ISSN 0098-3004.
- AZEVEDO, A. O planalto brasileiro e o problema da classificação de suas formas de relevo. **Boletim Paulista do Geografia**, n. 2, p. 43-50, 1949.
- BERTANI, T. C.; ROSSETTI, D. F.; ALBUQUERQUE, P. C. G. Object-based classification of vegetation and terrain topography in Southwestern Amazonia (Brazil) as a tool for detecting ancient fluvial geomorphic features. **Computers & Geosciences**, v. 60, p. 41-50, 2013.
- BETTÚ, D. F. **Nova metodologia probabilística multivariada para mapeamento de unidades de paisagem geomórficas**. 2012. 211 f. Tese (Doutorado em Geologia Ambiental) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- BIAS, E. S.; RIBEIRO, R. J. C.; BAPTISTA, G. M. M.; BERNARDI, J. V. E. Avaliação da exatidão do MDE obtido por meio do SRTM e pela de carta do IBGE na escala 1:100.000. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, n. 1, p. 149-155, 2011.
- BOCCO, G.; MENDOZA, M.; VELAZQUEZ, A. Remote sensing and GIS-based regional geomorphological mapping—a tool for land use planning in developing countries. **Geomorphology**, v. 39, p. 211-219, 2001.
- BRABYN, L. K. **Landscape classification using GIS and national digital databases**. 1996. 256 f. Doutorado (Doctor of Philosophy) - Department of Geography, University of Canterbury, New Zealand, 1996.
- BRABYN, L. K. Classification of macro landforms using GIS. **ITC Journal**, v. 1, p. 26-40, 1998.
- BRASIL - DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Projeto Sapucaí: Estados de Minas Gerais, Rio**

- de Janeiro e São Paulo.** Relatório Final de Geologia. Brasília: DNPM/CPRM, Superintendência Regional de São Paulo: 299 p., 1979.
- BRASIL -. **Projeto RADAMBRASIL, Folha SF.23/24 Rio de Janeiro/Vitória :geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra.** Projeto RADAMBRASIL. Rio de Janeiro: Departamento Nacional da Produção Mineral, 1983.
- BURROUGH, P. A.; VAN GAANS, P. F. M.; MACMILLAN, R. A. High-resolution landform classification using fuzzy k-means. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 113, n. 1, p. 37–52, 2000.
- CARR, J. R. Spectral and textural classification of single and multiple band digital images. **Computers & Geosciences**, v. 22, n. 8, p. 849-865, 1996. ISSN 0098-3004.
- CASSETI, V. Geomorfologia. 2005. Disponível em: < <http://www.funape.org.br/geomorfologia> >. Acesso em: 02/05/2013.
- CHRISTIAN, C. S. The concept of land units and land systems. In: PACIFIC SCIENCE CONGRESS, 9, 1958, Bangkok. **Proceedings...** Bangkok: Secretariat Ninth Pacific Science Congress, 1958. Vol. 20, p. 75-81.
- CHRISTOFOLETTI, A. Características fisiográficas do Planalto de Poços de Caldas (MG, Brasil). **Geomorfologia**, n. 32, p. 1-26, 1972.
- CHRISTOFOLETTI, A. A unidade morfoestrutural do planalto de Poços de Caldas. **Notícias Geomorfológicas**, v. 13, n. 26, p. 77-85, 1973.
- CONGALTON, R. G.; GREEN, K. **Assessing the accuracy of remotely sensed data: principles and practices.** New York: Lewis Publishers, 2009. 183 p.
- DIKAU, R.; Brabb, E. E.; Mark, R. K.; Pike, R. J. Morphometric landform analysis of New Mexico. **Zeitschrift für Geomorphologie**, N.F. Suppl.-Bd, Berlim, v. 101, p. 109-126, dez. 1995.
- DIKAU, R.; BRABB, E. E.; MARK, R. M. **Landform Classification of New Mexico by Computer.** EUA: U.S. Geological Survey: 15 p., 1991.
- DRĂGUT, L.; BLASCHKE, T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. **Geomorphology**, v. 81, p. 330-344, 2006.
- DRĂGUT, L.; EISANK, C. Automated classification of topography from SRTM data using object-based image analysis In: GEOMORPHOMETRY, 2, 2011. Redlands. **Proceedings...** Redlands: Esri, 2011. p.113-116.
- DRĂGUT, L.; EISANK, C. Automated object-based classification of topography from SRTM data. **Geomorphology**, v. 141-142, p. 21-33, 2012.
- EHSANI, A. H.; QUIEL, F. Geomorphometric feature analysis using morphometric parameterization and artificial neural networks. **Geomorphology**, v. 99, n. 1-4, p. 1-12, 2008.
- ELLERT, R. Contribuição à Geologia do Maciço Alcalino de Poços de Caldas. **Boletim da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras - USP**, v. 237, n. 18, p. 5-63, 1959.
- EMBLETON, C.; VERSTAPPEN, H. T. The nature and objectives of applied geomorphological mapping. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 68, p. 1-8, 1988.
- ESRI. **ArcGIS 10.1 for Desktop.** Redlands: ESRI, 2011. Cópia digital.
- EVANS, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude and descriptive statistics. In: CHORLEY, R. J. (Ed.). **Spatial Analysis in Geomorphology.** New York: Harper and Row, 1972. p.17-90.
- FENNEMAN, N. M. **Physiography of the Eastern United States.** Nova York: McGraw-Hill, 1938.
- GHIMIRE, M. Multivariate morphological characteristics and classification of first-order basins in the Siwaliks, Nepal. **Geomorphology**, v. 204, n. 1, p. 192–207, 2014.
- HAMMOND, E. H. Small scale continental landform maps. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 54, p. 32-42, 1954.
- HAMMOND, E. H. Analysis of properties in landform geography: An application to broadscale landform mapping. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 54, n. 1, p. 11-19, 1964.
- HENGL, T.; BAJAT, B.; REUTER, H. I.; BLAGOJEVIĆ, D. Geostatistical modelling of topography using auxiliary maps. **Computers & Geosciences**, v. 34, n. 12, p. 1886-1899, 2008.
- IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de geomorfologia.** Manuais técnicos em geociências. Rio de Janeiro: IBGE: 175 p., 2009.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo.** Escala 1:1 000 000. São Paulo: IPT, 1981.
- JOSHI, P. N.; MAURYA, D. M.; CHAMYAL, L. S. Morphotectonic segmentation and spatial variability of neotectonic activity along the Narmada–Son Fault, Western

- India: Remote sensing and GIS analysis. **Geomorphology**, v. 180-181, p. 292-306, 2013.
- KLINGSEISEN, B.; METTERNICHT, G.; PAULUS, G. Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, n. 1, p. 109-121, 2008.
- LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. **Biometrics**, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1977. ISSN 0006341X.
- LEONARDI, F. A. **A relação dos perfis lateríticos bauxíticos com as superfícies geomórficas do planalto de Poços de Caldas SP/MG**. 2007. 148 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.
- MACMILLAN, R. A.; SHARY, P. A. Landforms and Landform Elements in Geomorphometry. In: HENGL, T. e REUTER, H. I. (Ed.). **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Amsterdam: Elsevier, 2008. Cap. 09, p.227-256.
- MARTÍNEZ-ZAVALA, L.; LÓPEZ, A. J.; ROMERO, M. A.; PARRALES, I. G.; CROCCI, N. B. Clasificación Automática de Elementos Geomorfológicos en La Cuenca del Río Tepalcatepec (México) A partir de un Modelo Digital de Elevaciones. **Cuaternario y Geomorfología**, v. 19, n. 3-4, p. 49-61, 2005.
- MARTÍNEZ-ZAVALA, L.; LÓPEZ, A. J.; SANMIGUEL, P. I. Aplicación de un Sistema de Información Geográfica al Análisis del Medio Físico en el Parque Natural los Alcornocales. Aproximación a una Cartografía Geomorfológica a Partir de un Modelo Digital de Elevaciones. **Almoraima**, v. 35, p. 245-254, 2007.
- MARTINS, E. S. F. **Avaliação da exatidão cartográfica de dados SRTM e atualização da carta plani-altimétrica Salinópolis - NE do Pará**. 2010. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 2010.
- MEDEIROS, L. C.; FERREIRA, N. C.; FERREIRA, L. G. Avaliação da qualidade altimétrica dos modelos digitais de elevação obtidos a partir da missão SRTM e de curvas de nível do Mapeamento Sistemático Nacional na escala 1:100.000 para o Estado de Goiás e Distrito Federal. In: SIMPÓSIO NACIONAL DO CERRADO, 9, 2008, Brasília, DF. **Anais...** Brasília: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2008. p. s/p.
- MEIJERINK, A. M. J. Data acquisition and data capture through terrain mapping units. **ITC Journal**, v. 1, p. 23-44, 1988.
- METTERNICHT, G.; KLINGSEISEN, B.; PAULUS, G. A semi-automated approach for GIS based generation of topographic attributes for landform classification. In: INTERNATIONAL CARTOGRAPHIC CONFERENCE, 22, 2005, La Coruña. **Proceedings...** La Coruña: The International Cartographic Association, 2005. p.1-10.
- MORAES, F. T.; JIMÉNEZ-RUEDA, J. R. Fisiografia da região do planalto de Poços de Caldas, MG/SP. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 38, n. 1, p. 196-208, 2008.
- MORGAN, J. M.; LESH, A. M. Developing Landform Maps Using Esri's Modelbuilder. In: ESRI INTERNATIONAL USER CONFERENCE, 25, 2005, Redlands. **Proceedings...** Redlands: ESRI, 2005. p.1-11.
- PONÇANO, W. L.; CARNEIRO, C. D. R.; BISTRICHI, C. A.; ALMEIDA, F. F. M.; PRANDINI, F. L. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1981. 94p.
- ROSS, J. L. S. Relevo Brasileiro: uma nova proposta de classificação. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 4, p. 25-39, 1985.
- ROSS, J. L. S. **Geomorfologia - Ambiente e Planejamento**. . São Paulo: Contexto, 1990. 64p.
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: Laboratório de Geomorfologia Depto de Geografia FFLCH-USP/Laboratório de Cartografia Geotécnica - Geologia Aplicada - IPT/FAPESP, 1997. 63p.
- SCHMIDT, J.; HEWITT, A. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. **Geoderma**, v. 24, n. 3-4, p. 243-256, 2004.
- SOLNTSEV, N.A. Basic problems in Soviet landscape science. **Soviet Geography** – Review and Translation, v. 3, n. 6, p. 3-15, 1962.
- SPEIGHT, J. G. A parametric approach to landform regions. In: GEOGRAPHERS, I. O. B. (Ed.). **Progress in Geomorphology, Special Publication**. Oxford: Alden & Mowbray Ltd at the Alden Press, v.7, 1974. p.213-230.
- SPEIGHT, J. G. Landform. In: MCDONALD, R. C.; ISBELL, R. F.; SPEIGHT, J. G.; WALKER, J.; HOP, M. S. (Ed.). **Australian Soil and Land Survey Field Handbook**. Melbourne: Inkata Press, 1990. p.9-57.
- STEINKE, V. A.; SANO, E. E. Semi-automatic identification, GIS-based morphometry of geomorphic features of Federal District of Brazil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 12, n. 1, p. 3-9, 2011.

- TINÓS, T. M. **Mapeamento geológico-geotécnico a partir de metodologia de análise integrada: ensaio de aplicação no município de Poços de Caldas - MG.** 2011. 135 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.
- VASCONCELOS, V.; JÚNIOR, O. A. C.; MARTINS, E. S.; COUTO JUNIOR, A. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. Sistema de classificação geomorfométrica baseado em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 2, p. 171-186, 2012.
- VEATCH, J. O. Graphic and quantitative comparisons of land types. **Journal of the American Society of Agronomy**, v. 27, p. 505-510, 1935.
- VERHAGEN, P.; DRĂGUT, L. Object-based landform delineation and classification from DEMs for archaeological predictive mapping. **Journal of Archaeological Science**, v. 39, n. 3, p. 698-703, 2012.
- VERSTAPPEN, H. T.; VAN ZUIDAM, R. A. (1968) **ITC System of Geomorphological Survey**: ITC Textbook of Photo-interpretation. 3ª Ed. Enschede: International Institute of Aerial Survey and Earth Sciences, 1975. 52p.
- ZAINE, J. E. **Método de fotogeologia aplicado a estudos geológico-geotécnicos: ensaio em Poços de Caldas, MG.** 2011. 97 f. Tese (Livre – docência) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.