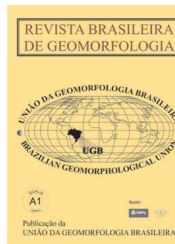


www.ugb.org.br
ISSN 2236-5664

Revista Brasileira de Geomorfologia

v. 17, nº 3 (2016)

<http://dx.doi.org/10.20502/rbg.v17i3.846>



COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO POR ÂNGULO ESPECTRAL E DISTÂNCIA EUCLIDIANA NO MAPEAMENTO DAS FORMAS DE TERRENO

COMPARISON BETWEEN SPECTRAL ANGLE MAPPER AND EUCLIDEAN DISTANCE IN LANDFORM MAPPING

João Paulo Sena-Souza

Faculdade UnB Planaltina, Universidade de Brasília
Área Universitária nº 01, Planaltina, Distrito Federal, CEP: 73.300-000, Brasil
Email: jpsenasouza@gmail.com

Osmar Abílio de Carvalho Junior

Departamento de Geografia, Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, Distrito Federal, CEP: 70.910-900, Brasil
Email: osmarjr@unb.br

Éder de Souza Martins

Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados, Embrapa
BR 020, km 18, Planaltina, Distrito Federal, CEP: 73.310-970, Brasil
Email: martieder@gmail.com

Vinicius Vasconcelos

Departamento de Geografia, Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, Distrito Federal, CEP: 70.910-900, Brasil
Email: vinicius.vascoza@gmail.com

Antônio Felipe Couto Junior

Faculdade UnB Planaltina, Universidade de Brasília
Área Universitária nº 01, Planaltina, Distrito Federal, CEP: 73.300-000, Brasil
Email: antoniofelipejr@gmail.com

Roberto Arnaldo Trancoso Gomes

Departamento de Geografia, Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, Distrito Federal, CEP: 70.910-900, Brasil
Email: robertogomes@unb.br

Renato Fontes Guimarães

Departamento de Geografia, Universidade de Brasília
Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília, Distrito Federal, CEP: 70.910-900, Brasil
Email: renatofg@unb.br

Informações sobre o Artigo

Recebido (Received):

04/09/2015

Aceito (Accepted):

14/05/2016

Palavras-chave:

Paisagem; Curvaturas; Mapeamento Geomorfológico; Assinatura Geomorfolométrica

Keywords:

Landscape; Curvature; Geomorphologic Mapping; Geomorphometric Signature.

Resumo:

A classificação supervisionada por assinaturas geomorfolométricas é um procedimento que pode auxiliar no mapeamento de formas de terreno a partir da utilização de medidas de similaridade ou distância. Este trabalho tem como objetivo comparar os métodos supervisionados de classificação a partir de medidas de similaridade e distância para o mapeamento do relevo. A comparação foi realizada no Campo de Instrução Militar de Formosa (GO), seguindo os seguintes passos: aquisição de dados HydroSHEDS, geração de imagens de curvatura, seleção de assinaturas geomorfolométricas (AG); classificação formas de terreno usando o método de classificação por ângulo espectral (SAM) e a distância euclidiana (DE); comparação da classificação através da matriz de tabulação cruzada, análise de modelo de elevação em 3D, avaliação da média e do desvio padrão das curvaturas para cada classe mapeada e observação em campo. A seleção de assinaturas geomorfolométrica considerou as seguintes etapas: (a) redução dos atributos geomorfolométricos pela transformação de Fração

Mínima de Ruído (MNF); (b) redução espacial pelo Índice de Pureza de Pixel (PPI); e (c) a seleção manual pelo n-Dimensional Visualizador. O processo de classificação adotou 14 AG que descrevem dois comportamentos: Tipo 1 - quando a curvatura longitudinal tem um valor maior que a curvatura transversal; e Tipo 2 - quando ocorre o inverso. O processo foi simplificado para seis classes de formas de terreno (FT): Convexo/Convexo (Cx/Cx); Côncavo/Convexo (Cc/Cx); Côncavo/Côncavo (Cc/Cc); Côncavo/Retilíneo (Cc/Rt); Convexo/Retilíneo (Cx/Rt); Retilíneo/Retilíneo (Rt/Rt). No mapeamento utilizando o SAM, as formas de relevo predominantes são Cc/Rt, Cx/Rt e Cc/Cx, indicando uma heterogeneidade com muitas áreas de transição e côncavas. A classificação a partir da DE mostrou prevalência de feições retilíneas (Rt/Rt). Apesar disso, essa FT apresentou os menores desvios e valores médios próximos de zero para todas as curvaturas, indicando que a DE foi o método mais eficiente para o mapeamento das áreas retilíneas.

Abstract:

The supervised classification from geomorphometric signatures (AG) is a proceeding that can help landform mapping using similarity or distance measures. This study aims to compare the supervised classification of similarity and distance methods to the landform mapping. The comparison was made in Campo de Instrução de Formosa (GO), divided into the following steps: acquiring HydroSHEDS data, generation of bending images, selection of geomorphometric signatures; landforms classification using the spectral angle mapper (SAM) and Euclidean Distance (DE) methods; comparing the classification using the cross-tabulation matrix, elevation model analysis in 3D, evaluation of the mean and standard deviation of the curvatures for each mapped class, and field observation. Selecting geomorphometric signatures considered the following steps: (a) reduction of geomorphometric attributes the transformation Minimum Noise Fraction (MNF); (B) spatial reduction by the Pixel Purity Index (PPI); and (c) the manual selection by the n-Dimensional Viewer. The classification process took 14 AG describing two behaviors: Type 1 - when the longitudinal curvature has a value greater than the transverse curvature; and Type 2 - when the opposite occurs. The process has been simplified to six landforms classes: Convex/Convex (Cx/Cx); Concave/Convex (Cc/Cx); Concave/Concave (Cc/cc); Concave/Rectilinear (Cc/Rt); Convex/Rectilinear (Cx/Rt); Rectilinear/Rectilinear (Rt/Rt). In SAM mapping, the predominant landforms are Cc/Rt, Cx/Rt and Cc/Cx, indicating heterogeneity in many transition and concave areas. The classification from DE showed prevalence of rectilinear features (Rt/Rt). However, this FT showed the smallest standard deviations and average values close to zero for all curvatures, indicating that was the most efficient method for mapping the rectilinear areas.

1. Introdução

A geomorfometria busca descrever a superfície topográfica de forma quantitativa e perpassa por diferentes campos do conhecimento, tais como: computação, matemática, engenharia civil e ciências da Terra (EVANS, 1972; MACMILLAN e SHARY, 2009; PIKE *et al.*, 2009). Este ramo da ciência destaca a importância das formas de terreno na paisagem para compreender os processos geomorfológicos, geológicos, hidrológicos, ecológicos e de formação dos solos. As formas do terreno são utilizadas na interpretação ou inferência de processos superficiais como erosão e denudação (áreas convexas) ou acumulação e deposição (áreas côncavas) (MACMILLAN e SHARY, 2009).

Basicamente, os principais dados na geomorfometria são parâmetros e objetos extraídos de Modelos Digitais de Elevação (MDE), que são utilizados para diferentes propósitos, tais como: classificação das Formas de Terreno (FT) (DRAGUT e EISANK, 2011; EHSANI e QUIEL 2008, 2009; EHSANI *et al.*, 2010; SAHA *et al.*, 2011; VASCONCELOS *et al.*, 2012), delimitação e classificação de bacias de drenagem (MENKE *et al.*, 2013; OLIVEIRA *et al.*, 2007; SODRÉ *et al.*, 2007), movimentos de massa (GOMES *et al.*, 2008; GUIMARÃES *et al.*, 2009), mapeamento de solos (BARBIERI *et al.*, 2008; CAMARGO *et al.*, 2010; CHAGAS *et al.*, 2013; LEÃO *et al.*, 2011), detecção de fitofisionomias (BISPO *et al.*, 2010; CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2008; COUTO JÚNIOR *et al.*, 2010; FONSECA e SILVA JÚNIOR, 2004), entre vários outros propósitos.

As FTs têm o potencial de separar sistemas geomorfológicos distintos e, conseqüentemente, influenciar no mapeamento de atributos de solo e vegetação. Portanto, o mapeamento das FTs pode subsidiar a escolha de áreas representativas do funcionamento da dinâmica de elementos bióticos e abióticos, adquirindo um papel fundamental para a gestão dos recursos naturais. Com a maior disponibilização de MDE nas últimas décadas e o desenvolvimento de técnicas de análise dos atributos geomorfométricos em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) houve um avanço significativo na geomorfometria para a classificação das FTs (DRAGUT e BLASCHKE, 2006; DRAGUT e EISANK, 2011; EVANS, 2012; IWAHASHI e PIKE, 2007; JASIEWICZ e STEPINSKI, 2013; KLINGSEISEN, *et al.*, 2008; REU *et al.*, 2013; SAHA *et al.*, 2011; VASCONCELOS *et al.*, 2012). A seleção dos atributos geomorfométricos

a ser utilizada, normalmente, depende do relevo a ser modelado, do procedimento de classificação e do MDE disponível. Os métodos de classificação podem ser divididos em: (a) classificação por meio de regras definidas com base em opinião especializada, (b) classificação supervisionada e (c) classificação não-supervisionada.

O conhecimento e o juízo especializado podem ser codificados em um conjunto de regras e aplicados para classificar formas de relevo. Este procedimento é equivalente ao emprego de uma árvore de decisão. Vários autores propuseram um conjunto de regras e sistemas especialistas para compartimentar o relevo (DIKAU, 1989; BLASZCZYNSKI, 1997; GRAFF e USERY, 1993; MACKAY *et al.*, 1992; WOOD, 1996). Alguns métodos aplicam classificações contínuas baseadas em lógica *fuzzy* a partir de um modelo semântico (MACMILLAN *et al.*, 2000).

A classificação não supervisionada requer pouca participação do especialista e não requer um conhecimento a priori, consiste em um processo de dividir o conjunto de dados em classes homogêneas a partir de medidas de similaridade, distância, conectividade ou intensidade. É utilizada, principalmente, quando não se sabe exatamente o número de classes que será mapeada, ou seja, incide em uma análise exploratória da área em estudo. Diferentes métodos de classificação não supervisionada têm sido aplicados para a distinção das FTs, tais como os algoritmos: *Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique* – ISODATA (ADEDIRAN *et al.*, 2004; IRWIN *et al.*, 1997), *fuzzy K-means* (ARREL *et al.*, 2007; BURROUGH *et al.*, 1997, 2000; IRWIN *et al.*, 1997), *nested-means* (IWAHASHI e PIKE, 2007), e *Self-Organizing Map* – SOM (BUE e STEPINSKI, 2006; EHSANI e QUIEL, 2008; EHSANI *et al.*, 2010).

Em contraposição, a classificação supervisionada depende do conhecimento do analista na seleção de amostras que servirão de referência na classificação (MENESES e SANO, 2012). Diferentes autores utilizaram técnicas de classificação supervisionada para a classificação de formas de relevo, tais como: classificação por assinatura geomorfométrica (AG) (PIKE, 1988; PRIMA *et al.*, 2006), classificação por máxima verossimilhança (BROWN *et al.*, 1998) e redes neurais (BROWN *et al.*, 1998).

A classificação usando AG seria correlata a classificação espectral do sensoriamento remoto, onde o cálculo de similaridade ou distância é realizado entre as

curvas padrões e o alvo pretendido (PIKE, 1988). As medidas relacionadas à distância são mais amplamente utilizadas, destacando-se a Distância Euclidiana (MILIARENIS e ILIOPOULOU, 2004) e a Distância de Jeffries-Matusita (JM) (PRIMA *et al.*, 2006). As medidas de similaridade são amplamente utilizadas na classificação de imagens de sensoriamento remoto, principalmente as medidas: *Spectral Correlation Mapper* (SCM) (CARVALHO JÚNIOR e MENESES, 2000) e o *Spectral Angle Mapper* (SAM) (KRUSE *et al.*, 1993). Vasconcelos *et al.* (2012) utilizaram o SAM para separar diferentes formas topográficas na paisagem a partir de AGs. Apesar dos resultados satisfatórios da classificação utilizando o SAM, a similaridade ainda não é o método mais adotado para classificação de formas de terreno, principalmente em área planas. O SCM ainda não foi utilizado para classificação de FT, sendo sua aplicação direcionada ao sensoriamento remoto na classificação de imagens hiperespectrais e na detecção de mudanças (CARVALHO JÚNIOR *et al.*, 2009, 2011).

Neste contexto, o objetivo desse trabalho é comparar os métodos de classificação a partir da AG utilizando métricas de similaridade e de distância no mapeamento das formas de terreno. Deste modo, busca-se o entendimento e compreensão do funcionamento desses métodos na classificação das formas de relevo aplicados na área do Campo de Instrução Militar de Formosa, localizado na bacia do Rio Preto, Goiás.

2. Área de Estudo

O Campo de Instrução Militar de Formosa está contido no município de Formosa-GO, fazendo divisa ao sul com o Estado de Minas Gerais e para oeste com Distrito Federal. Possui uma área de aproximadamente 115.000 hectares. A área faz parte da bacia hidrográfica do Rio Preto, afluente do Rio São Francisco. Esta área é limitada a leste pelo rio Bezerra e a oeste pelo próprio rio Preto (Figura 1).

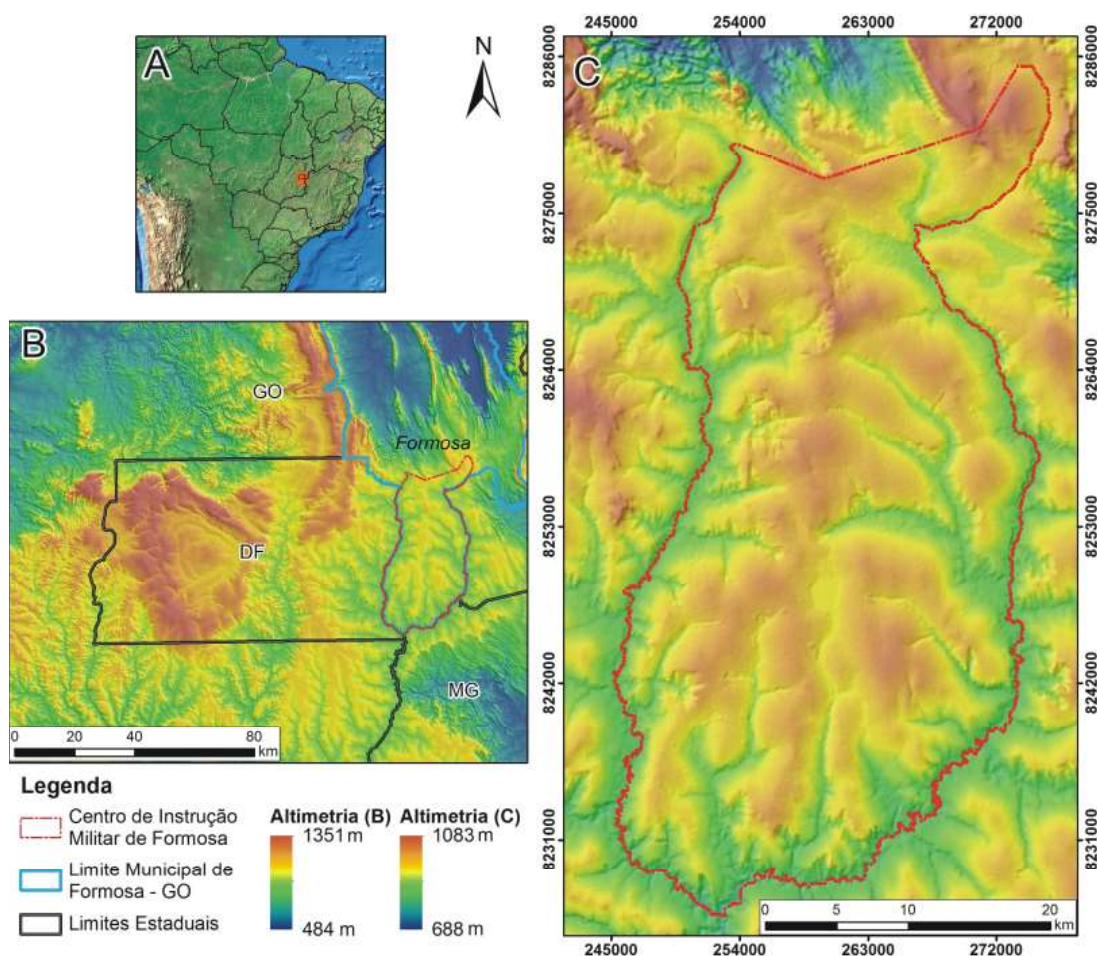


Figura 1 – Localização do Campo de Instrução Militar de Formosa no contexto nacional (A), regional com altimetria (metros de altitude) da região do Distrito Federal e entorno (B) e altimetria local (C).

Conforme Silva *et al.* (2008), o clima da região é tropical úmido de savana com inverno seco (Aw de Köppen). A principal característica é a sazonalidade intensa com chuvas concentradas entre os meses de outubro e abril. A precipitação média anual fica entre 1100 e 1600 mm mal distribuída entre os meses do ano. Os meses de junho, julho e agosto atingem média mensal de apenas 50 mm, enquanto o mês de janeiro pode alcançar 320 mm. A temperatura média anual é de 20-21 °C. A umidade relativa do ar é muito baixa nos meses de inverno, podendo atingir níveis inferiores a 15%.

A região apresenta falhas de empurrão, cavalgamentos e grandes variações na espessura dos conjuntos litológicos, que são característicos da Faixa Brasília formada na Orogênese Brasileira do Neoproterozóico/Cambriano (SCISLEWSKI *et al.*, 2003). Em toda a área de estudo são encontradas rochas dos grupos Paranoá e Bambuí, além de pequenas áreas de embasamento cristalino. O Grupo Bambuí é o mais expressivo da área de estudo, sendo representado pelo Sub-Grupo Paraopeba com alternâncias de siltitos e argilitos entremeadas com ocasionais lentes de calcário (CAMPOS *et al.*, 2006). Estas rochas apresentam um alinhamento estrutural com o sistema de falhamentos Unai com direção geral NNO-SSE (BRASIL, 1982).

O relevo da região foi desenvolvido a partir dos ciclos de erosão Sul-americano (desenvolvido entre o Terciário Inferior e Médio) e Velhas (entre o Terciário Médio e Superior) (BRAUN, 1971). As porções mais altas do Campo de Instrução Militar de Formosa são remanescentes da superfície Sul-americana enquanto as mais rebaixadas representam a superfície de aplainamento Velhas (KING, 1956). A área de estudo está inserida na Unidade do Planalto Retocado do Alto Rio Preto formado por saprólitos desenvolvidos sobre rochas pelíticas. Essas rochas estão intercaladas com lentes de calcário, que formam ambientes cársticos como dolinas e lagoas cársticas. Os divisores de drenagem possuem formas convexas suaves com vertentes retilíneas, enquanto as drenagens são bem acomodadas formando vales côncavos encaixados (DANTAS, 2003) (Figura 2).

As condições ambientais e climáticas favorecem o acúmulo de ferro (Fe) em forma de hematita (Fe_2O_3) nos limites do relevo suave-ondulado (MARTINS, 2000; PENTEADO, 1976). O Fe se desloca do interior e se dirige para as bordas por acepção lateral, onde encontra a zona de déficit hídrico formando couraças

lateríticas (MARTINS, 2000; MARTINS *et al.*, 2004). O relevo estável de plano e suave ondulado com o padrão convexo favorece a presença dos Latossolos (REATTO *et al.*, 2009). Os solos da área de estudos seguem a organização das catenas na forma de hidrosequências características do bioma Cerrado, de acordo com a disponibilidade hídrica e profundidade do perfil (MACEDO e BRYANT, 1987). Na maior parte das sequências a ordem dos Latossolos é invertida, com o Latossolo Amarelo aparecendo no topo, com pouca espessura acima da coureira laterítica (LIMA *et al.*, 2009). Isso ocorre quando o topo é resquício do processo erosivo. Estas sequências ocorrem organizadas com topos convexos seguidos a jusante por rampas de colúvio (DANTAS, 2003) desenvolvidas em planos inclinados em direção à drenagem com predomínio de formas retilíneas (Figura 2).

Os solos em geral são muito espessos e o perfil de intemperismo é profundo devido às condições climáticas. As principais classes de solos encontradas na área de estudos são os Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo, Cambissolos e Solos Hidromórficos. Os solos Hidromórficos estão associados à influência do lençol freático e acúmulo de água nas superfícies deprimidas e côncavas (ocorre a presença de Gleissolos e Plintossolos Háplicos).

3. Material e Métodos

A metodologia possui as seguintes etapas: (a) aquisição dos dados SRTM; (b) geração das imagens de curvaturas a partir do MDE; (c) organização dos dados de curvaturas como bandas de uma única imagem; (d) seleção das assinaturas geomorfométricas; (e) classificação das FTs utilizando o SAM e a DE; (f) comparação entre os métodos usando tabulação cruzada; e (g) reconhecimento das FT por meio de observação dos padrões de relevo em campo.

3.1 Dados SRTM

O programa Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) adquiriu dados topográficos de 80% da superfície terrestre (entre as latitudes 60°N e 57°Sul) no período de 11 dias no ano 2000 (RABUS *et al.*, 2003), utilizando dois radares de abertura sintética relativos à banda C (5,6cm; C-RADAR) e a banda X (3,1cm; X-RADAR). O MDE da SRTM consiste em

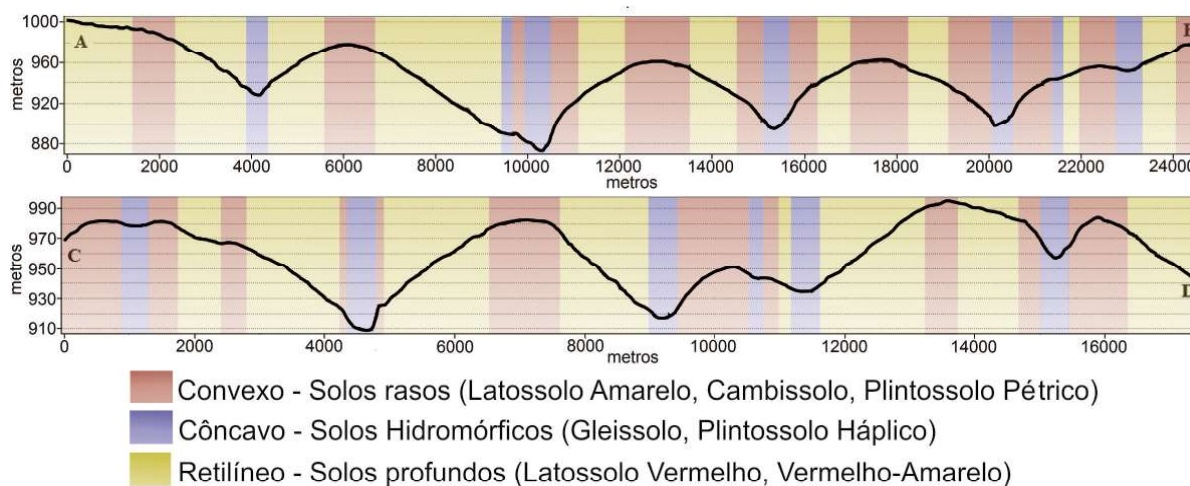
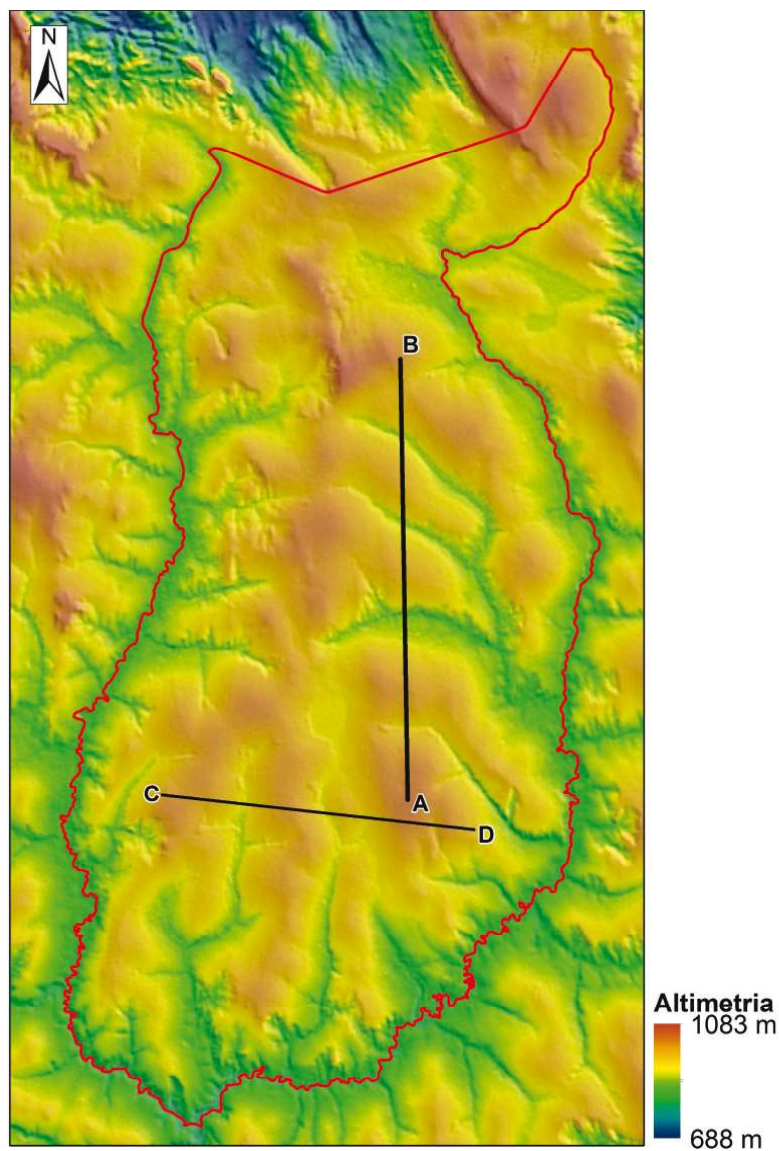


Figura 2 - Representação do relevo da área de estudos por meio dos perfis topográficos A/B e C/D. Cada cor no gráfico de perfil topográfico representa uma forma (Vermelho - Convexo; Azul - Côncavo; Amarelo - Retilíneo). A legenda mostra os tipos de solos mais prováveis para cada forma representada.

uma grade regular com resolução espacial de 3 arcsec (~90 metros) ou 1 arcsec (~30 metros). A precisão vertical absoluta dos dados de elevação é de 16 metros (com 90% de confiança) (https://lta.cr.usgs.gov/srtm/mission_summary). A disponibilização desses dados causou um avanço importante nas pesquisas sobre a superfície terrestre (VAN ZYL, 2001). Entretanto, os dados SRTM possuem limitações como vazios (ausência de dados em determinadas áreas), presença de dados espúrios, presença de vórtices e definição errônea de linhas de drenagem (JARVIS *et al.*, 2004; LUEDELING *et al.*, 2007; RABUS *et al.*, 2003). Nesse trabalho foi utilizado o produto HydroSHEDS (Hydrological data and maps based on Shuttle Elevation Derivatives at multiple Scales) com resolução de 90 m, desenvolvido pelo programa de ciência da conservação do Fundo Mundial da Vida Selvagem (WWF) em conjunto com o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) e outras instituições (na projeção UTM e datum SIRGAS 2000). Optou-se por este produto, pois apresenta uma correção dos dados SRTM a partir da conformidade das drenagens e técnicas de filtragens (LEHNER *et al.*, 2006).

3.2 Atributos de Terreno

A superfície topográfica pode ser expressa em curvaturas de plano e de perfil (KLINGSEISEN *et al.*, 2008). A curvatura de perfil segue a declividade, indicando a concavidade e convexidade da vertente, enquanto que a curvatura de plano é perpendicular à declividade, indicando convergência e divergência de fluxo superficial (BLASZCZYNSKI, 1997). Na presente pesquisa, os atributos morfométricos utilizados para descrever as FTs foram as curvaturas Longitudinal (c_{long}), Transversal (c_{trans}), Mínima (c_{min}) e Máxima (c_{max}) (WOOD, 1996; YOUNG, 1978), que são expressas pelas seguintes equações:

$$c_{long} = -2 \left(\frac{ad^2 + be^2 + cde}{d^2 + e^2} \right) \quad (1)$$

$$c_{trans} = -2 \left(\frac{bd^2 + ae^2 - cde}{d^2 + e^2} \right) \quad (2)$$

$$c_{min} = -a - b + \sqrt{(a-b)^2 + c^2} \quad (3)$$

$$c_{max} = -a - b - \sqrt{(a-b)^2 + c^2} \quad (4)$$

onde “a”, “b”, “c”, “d” e “e” são variáveis baseadas nas nove elevações (Z) da janela (Figura 3), descritas pelas equações:

$$a = \frac{\left(\frac{Z_4 + Z_6}{2} - Z_5 \right)}{L^2} \quad (5)$$

$$b = \frac{\left(\frac{Z_2 + Z_8}{2} - Z_5 \right)}{L^2} \quad (6)$$

$$c = \frac{(-Z_1 + Z_3 + Z_7 - Z_9)}{4L^2} \quad (7)$$

$$d = \frac{(-Z_4 + Z_6)}{2L} \quad (8)$$

$$e = \frac{(-Z_2 + Z_8)}{2L} \quad (9)$$

onde “L” é a distância entre os pontos da matriz nas direções de linha e coluna e deve estar na mesma unidade que o Z (ZEVENBERGEN e THORNE, 1987).

Na elaboração das imagens de curvaturas foi utilizada uma janela de dimensão 11x11 com o propósito de eliminar os valores discrepantes e pixels isolados (VASCONCELOS *et al.*, 2012). As curvaturas foram organizadas em uma imagem contendo quatro bandas:

Z_1	Z_2	Z_3
Z_4	Z_5	Z_6
Z_7	Z_8	Z_9

Figura 3 - Representação de uma janela 3x3 sobre o Modelo Digital de Elevação demonstrando os posicionamentos e as elevações dos pontos (Z) referentes às equações das curvaturas (ZEVENBERGEN e THORNE, 1987).

Banda 1-Curvatura Longitudinal; Banda 2-Curvatura Transversal; Banda 3-Curvatura Mínima; Banda 4-Curvatura Máxima. Deste modo, cada pixel possui uma AG que representa uma FT, de forma semelhante às imagens multibandas de sensores orbitais (VASCONCELOS *et al.*, 2012). Para uma melhor visualização do dado, os valores dos pixels das imagens de curvatura foram multiplicados por 10.

3.3 Seleção das Assinaturas Geomorfométricas de Referência

O termo “assinatura” é oriundo dos trabalhos de sensoriamento remoto e foi adaptado para os estudos de geomorfologia (PIKE e ROZEMA, 1975). Uma assinatura consiste em um conjunto de medidas de atributos que diferencia um objeto dos demais. As AGs de referência foram selecionadas considerando três etapas (BOARDMAN e KRUSE, 1994): (a) redução da quantidade de atributos pelo algoritmo *Minimum Noise Fraction* (MNF) (GREEN *et al.*, 1988); (b) redução da quantidade da informação espacial pelo método *Pixel Purity Index* (PPI) (BOARDMAN *et al.*, 1995); (c) seleção manual das AGs pelo visualizador n-dimensional. O MNF é um método derivado da Análise de Principais Componentes (GREEN *et al.*, 1988). Este método separa a componente de ruído da imagem, reduz a dimensionalidade dos dados e auxilia na identificação dos membros finais da imagem (CARVALHO JUNIOR *et al.*, 2003). O PPI é utilizado para identificar os pixels com maior nível de pureza entre os membros finais gerados na etapa do MNF. Os pixels puros identificados pelo PPI foram distribuídos no visualizador n-dimensional, um gráfico com o número de dimensões correspondentes ao número de bandas da imagem (curvaturas) que permite a seleção das AGs de referência. A quantidade de assinaturas selecionadas na nuvem de pixels no visualizador n-dimensional depende diretamente do analista. No presente trabalho foram selecionadas 14 AGs.

3.4 Classificação a partir das medidas *Spectral Angle Mapper* e Distância Euclidiana

As AGs de referência (AGR) foram comparadas com as curvas geomorfométricas dos pixels (CGPs) presentes na imagem pelos métodos SAM e DE. O SAM é uma medida de similaridade que visa obter o ângulo formado entre a assinatura de referência e a curva do

pixel em um espaço n-dimensional, considerando os pixels como vetores (Figura 4). Os valores de SAM são dados em radianos, onde o menor valor de α tem a maior semelhança entre as assinaturas (KRUSE *et al.*, 1993). O SAM é calculado pela equação:

$$\alpha = \cos^{-1} \frac{\sum_{i=1}^{nb} AGR_i CGP_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^{nb} (AGR_i)^2 \sum_{i=1}^{nb} (CGP_i)^2}} \quad (10)$$

onde “nb” é o número de bandas da imagem. Cada assinatura corresponde a uma classe de acordo com o grau de similaridade ou ângulo espectral. Neste caso, o pixel foi classificado pela AG que apresentou o menor ângulo espectral com relação à CGP.

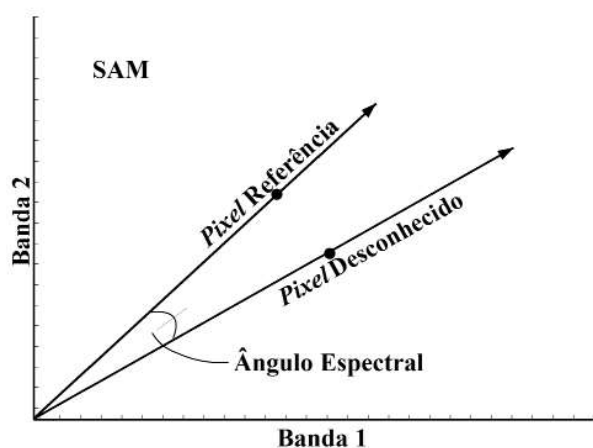


Figura 4 - Representação do algoritmo SAM em um espaço bidimensional.

A DE é a medida mais utilizada entre os classificadores de distância. A distância entre os dois pontos (AG e CGP) no espaço n-dimensional é descrito por:

$$DE = \sqrt{\sum_{i=1}^{nb} (AG_i - CGP_i)^2} \quad (11)$$

Neste método, quanto maior for a distância, menor é a possibilidade do espectro da imagem pertencer ao grupo da referência (Figura 5). Para efetuar a classificação, o pixel adquire o rótulo da curva com menor DE.

No presente trabalho, a classificação foi realizada para os dois métodos considerando 14 AGs. Posteriormente, as classes foram aglutinadas em seis feições morfométricas ou FTs com o propósito de simplificar e facilitar a comparação entre os métodos.

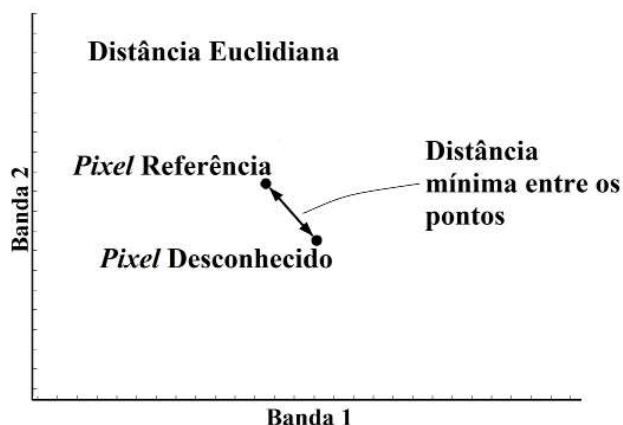


Figura 5 - Representação da DE em um espaço bidimensional.

3.5 Comparação entre os métodos

A comparação entre os métodos SAM e DE foi realizada por meio da análise estatística das classes (porcentagem de área, valor médio de elevação altimétrica e declividade) e pela tabulação cruzada entre os dois mapas. As análises foram realizadas tanto para as 14 classes, como também para os mapas com as seis classes aglutinadas: Côncavo/Côncavo (Cc/Cc); Côncavo/Retilíneo (Cc/Rt); Convexo/Côncavo (Cx/Cc); Convexo/Convexo (Cx/Cx); Convexo/Retilíneo (Cx/

Rt); Retilíneo/Retilíneo (Rt/Rt). A tabulação cruzada entre os dois métodos permite evidenciar as principais diferenças e semelhanças existentes.

Os resultados do mapeamento das FTs também foram comparados visualmente inserindo cada classe em Modelos de Elevação em 3D. Além disso, foram calculadas as médias e o desvio padrão das curvaturas para cada uma das seis formas aglutinadas a fim de avaliar qual resultado se aproxima dos valores de curvatura esperados para cada FT. Por exemplo, os valores das curvaturas esperados para a classe Rt/Rt deveriam ter média próxima de zero; para a classe Cc/Cc os valores deveriam estar negativos.

4. Resultados

4.1 Assinaturas Geomorfométricas

A figura 6 apresenta as imagens referentes às curvaturas que constituem as AGs. Foram selecionadas 14 AGs que descrevem dois comportamentos: Tipo 1 quando a curvatura longitudinal tem um valor maior que a curvatura transversal (Figura 7), e Tipo 2 quando ocorre o inverso (Figura 8). As métricas de similaridade e distância apresentam comportamentos diferentes conforme os formatos das assinaturas de referência.

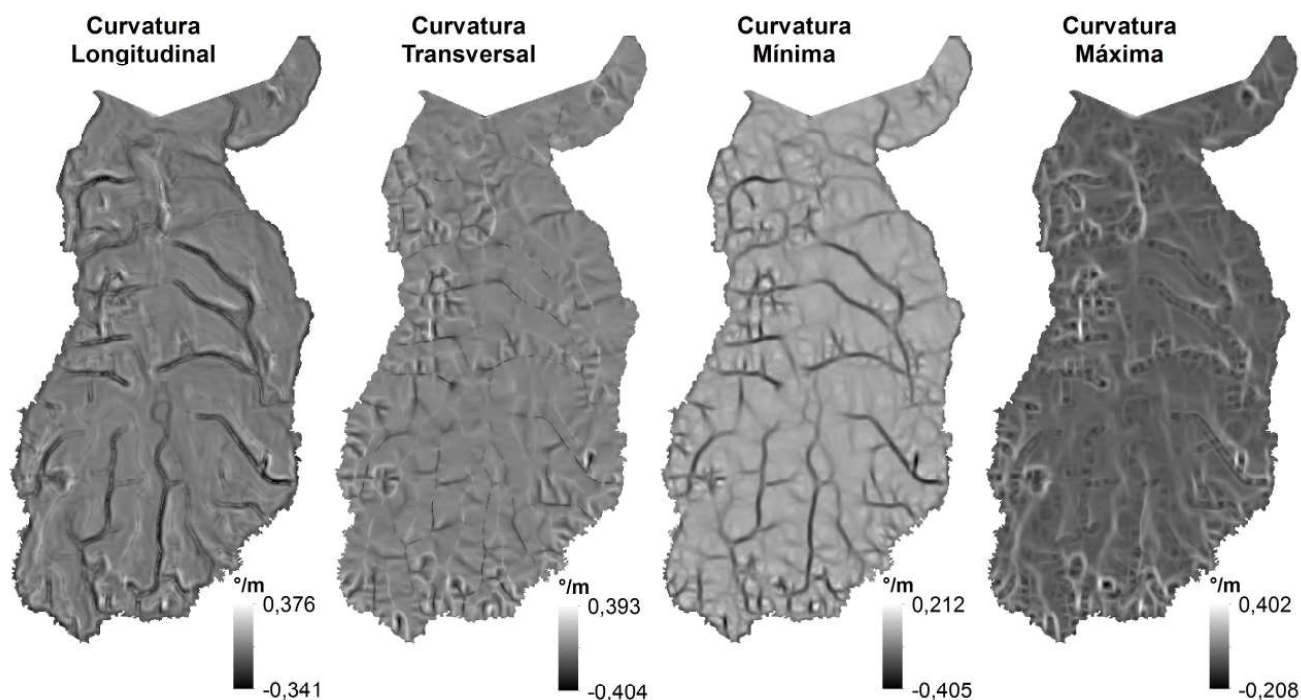


Figura 6 – Curvaturas de perfil apresentadas em valores reais utilizadas no mapeamento das FT do Campo de Instrução Militar de Formosa. É possível observar que estão na mesma ordem de grandeza de valores (entre 0,4 e -0,4°/m aproximadamente).

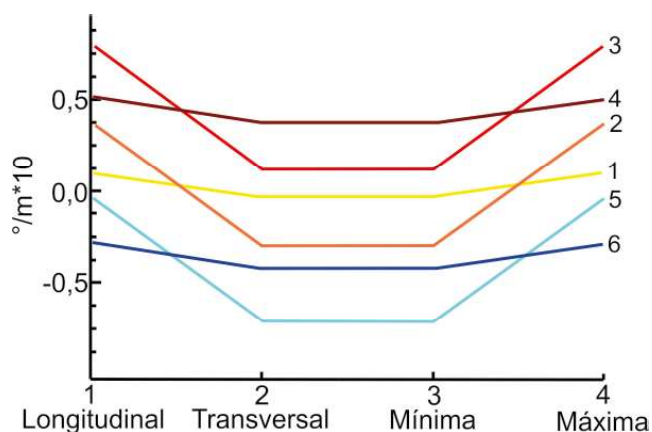


Figura 7 - Assinaturas Geomorfométricas de referência Tipo 1 selecionadas para o mapeamento das formas de terreno.

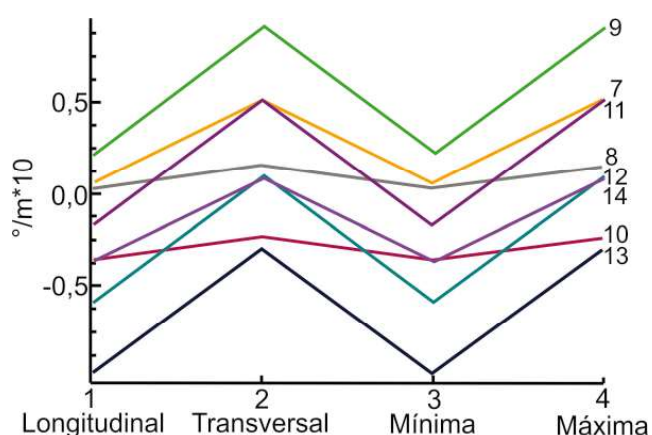


Figura 8 - Assinaturas Geomorfométricas de referência Tipo 2 selecionadas para o mapeamento das formas de terreno.

4.2 Classificações utilizando os métodos SAM e DE

Os métodos SAM e DE apresentaram como dados de saída um conjunto de imagens de regras relativo ao conjunto de AGs de referência e a imagem classificada. As imagens de regra expressaram o ângulo (método SAM) (Figura 9) ou a distância mínima (método DE) (Figura 10) entre uma AG e os pixels da imagem. A comparação das imagens de regra de uma mesma AG para as duas medidas (SAM e DE) realçou as diferenças entre os dois classificadores.

As AGs 1 e 8, por exemplo, apresentaram curvaturas com valores próximos de zero, porém a configuração da AG-1 possui um formato Tipo 1 e da AG-8, um formato Tipo 2 (Figuras 7 e 8). As imagens

de regra do SAM tornaram nítidas as diferenças entre as AGs 1 e 8 (Figura 9), enquanto que as provenientes da DE não proporcionaram uma nítida distinção entre as duas formas (Figura 9). Neste caso, as imagens de regra mostraram que o SAM distinguiu o formato das AGs (Tipo 1 ou Tipo 2), enquanto a DE não obteve o mesmo êxito devido à proximidade dos valores. Em contraposição, as AGs 10 e 13 com formatos de curvas similaridades (Tipo 2) e valores diferentes foram pouco distinguidas pelo método SAM e adquiriram comportamentos distintos no método DE.

A classificação das 14 AGs usando o SAM apresentou uma distribuição mais heterogênea e fragmentada do que a obtida pela DE. Na classificação pelo SAM, as AGs 5, 12 e 13 relativas às formas côncavas evidenciaram as drenagens. Contudo, o restante das classes apresentou uma distribuição fragmentada que não seguem um padrão aparente. Em contraposição, o mapeamento pela DE demonstra uma distribuição mais homogênea das classes. É possível observar uma presença maior das feições planas AGs 1 e 8 e os padrões de drenagem pela AG 13 (Figura 11).

No mapeamento do SAM, a AG-5 foi a mais representativa com 12,11%, seguida pela AG-3, com 11,25%. Por outro lado, as AGs 6, 9 e 10 tiveram a menor representatividade com 2,82%, 2,01% e 1,65%, respectivamente. Na classificação por DEs as mais representativas foram a AG-1 (15,78%) e a AG-8 (14,44%), enquanto as menos representativas foram as AGs 6 (2,01%) e 10 (3,19%) (Tabela 1).

A tabela 2 demonstra a tabulação cruzada entre os métodos SAM e DE, evidenciando as principais diferenças existentes. Os dados foram normalizados em porcentagem considerando a coluna do SAM, a qual tem o somatório igual a 100%. Os dois métodos apresentaram resultados diferentes, onde somente 43,41% dos pixels foram classificados na mesma classe em ambos. Observou-se que várias classes do SAM apresentam uma baixa porcentagem que se mantêm inalterada pela classificação DE, principalmente as classes AG-12 (25,86%), AG-9 (28,07%) e AG-8 (33,02%). As classes do SAM com maior semelhança com as do DE foram AG-5 (56,04%) AG-13 (54,88%) e AG-2 (54,58%), com valores um pouco acima de 50%.

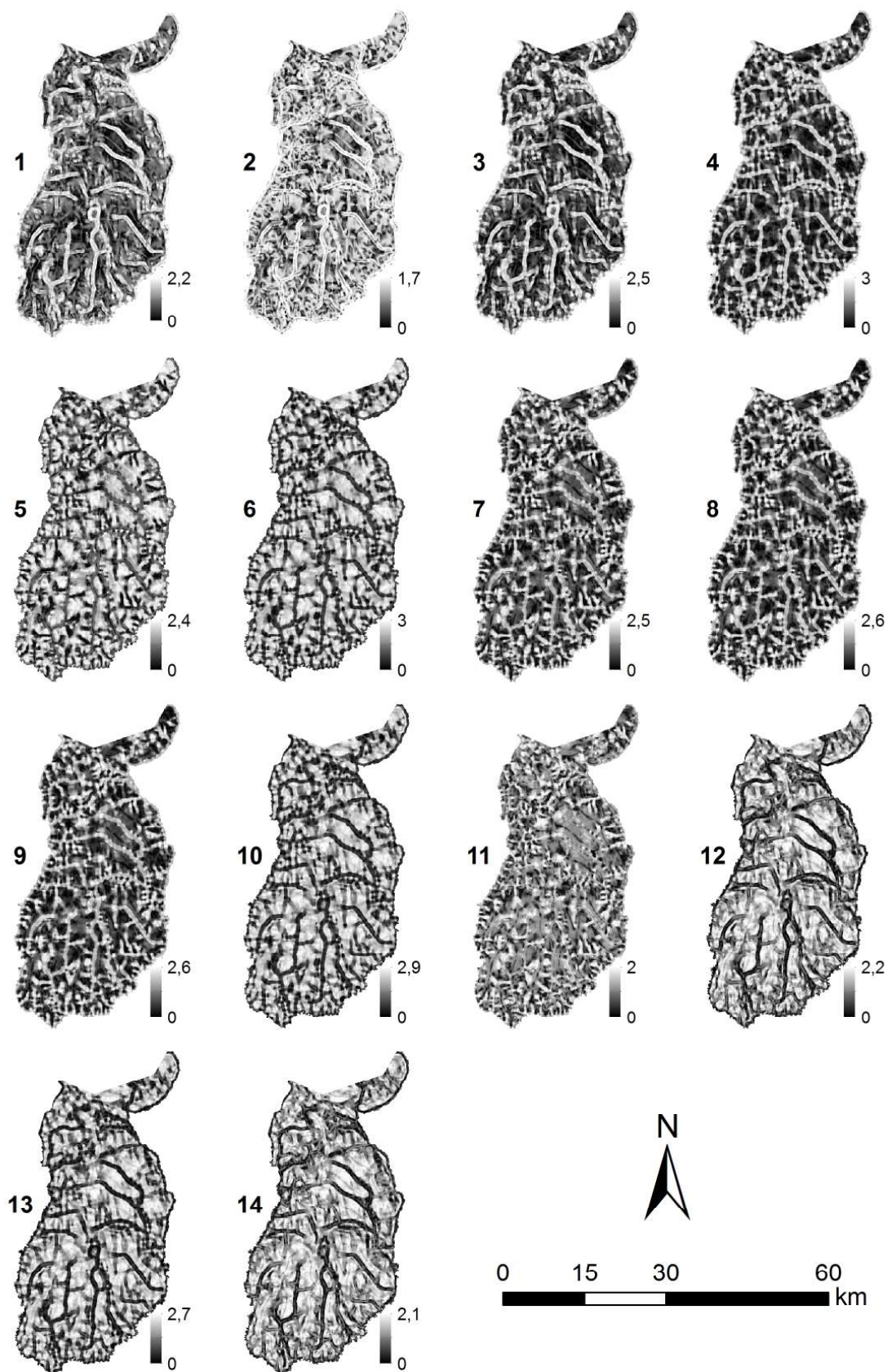


Figura 9 - Imagens de regra geradas para cada AG na classificação pelo método SAM. Cada pixel representa o ângulo em radianos entre a curva de referência e o pixel da imagem de curvatura.

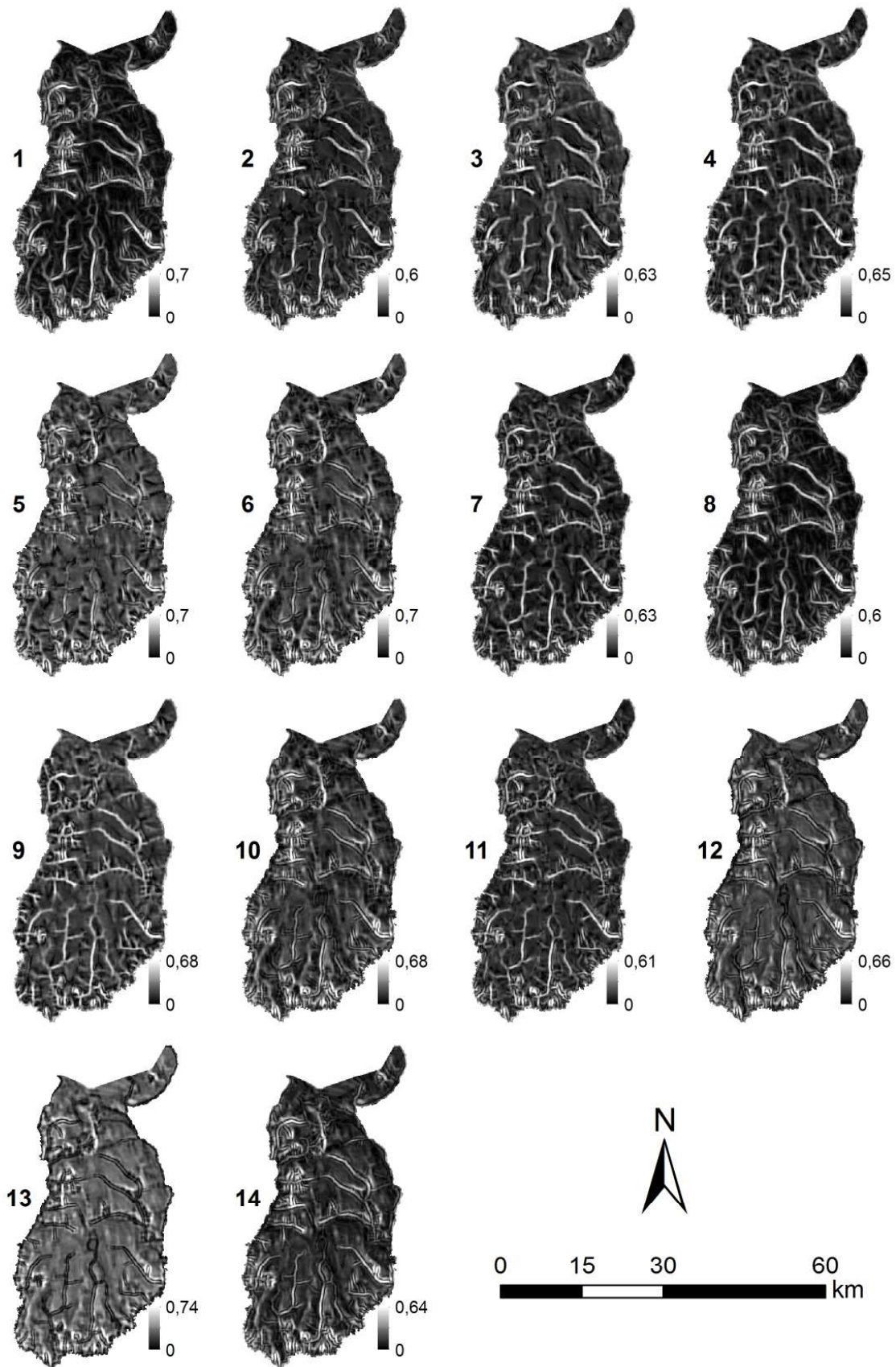


Figura 10 - Imagens de regra geradas para cada AG na classificação pela DE. Cada pixel representa a distância mínima entre a curva de referência e o pixel da imagem de curvatura.

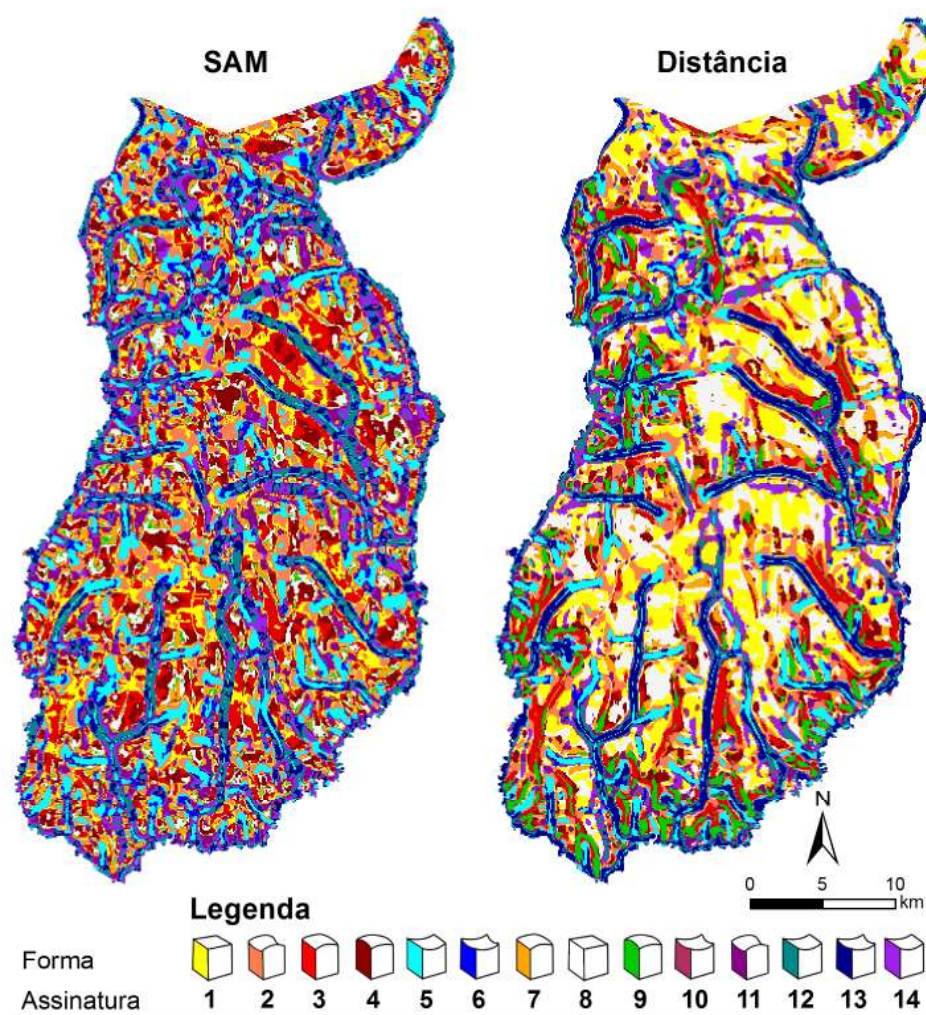


Figura 11 – Classificação da imagem de curvaturas utilizando as 14 AG pelo SAM e por DE. A legenda indica o número da assinatura e a FT que cada uma representa.

Tabela 1: Porcentagem de área ocupada por cada classe de AG mapeada.

AG	SAM	DE
	%	%
1	7,62	15,78
2	8,69	7,87
3	11,25	7,29
4	8,51	4,92
5	12,11	7,46
6	2,82	2,01
7	7,31	6,52
8	6,77	14,44
9	2,01	5,21
10	1,65	3,19
11	8,99	4,25
12	7,38	5,29
13	7,73	9,89
14	7,14	5,88

Tabela 2: Tabulação cruzada de porcentagem entre a classificação SAM e DE. Os valores apresentam as diferenças ou semelhanças entre as duas classificações e estão expressos em porcentagem (%).

Ass. Geom.	SAM														Total	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
DE	1	42,62	42,13	26,26	2,35	21,91	9,9	2,37	0,96	0,93	7,9	7,74	3,81	5,14	14,26	15,78
	2	29,18	54,58	0,99	0	6,46	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0,03	7,87
	3	25,75	0,66	42,58	5,09	0	0	0,38	0,28	0,25	0	0	0	0	0	7,29
	4	0	0	9,55	40,61	0	0	0	5,68	0	0	0	0	0	0	4,92
	5	0	2,41	0	0	56,04	12,07	0	0	0	0	0	0,19	0,83	0,59	7,46
	6	0	0	0	0	5,37	34,72	0	0	0	16,67	0	0	1,34	0	2,01
	7	0,63	0	2,7	2,15	0	0	38,42	32,78	37,8	0	2,25	0	0	0	6,52
	8	1,48	0	17,44	42,46	0	0	34,46	33,02	32,95	0	35,17	0	0	2,4	14,44
	9	0,03	0	0,48	7,35	0	0	22,94	27,28	28,07	0	4,92	0	0	0	5,21
	10	0	0	0	0	4,56	23,6	0	0	0	40,79	0	0	16,83	0	3,19
	11	0,31	0,02	0	0	0	0	1,44	0	0	0	44,97	0	0	1,11	4,25
	12	0	0	0	0	0,29	0	0	0	0	0	0,01	25,86	9,99	35,95	5,29
	13	0	0	0	0	2,78	19,71	0	0	0	34,64	0	52,13	54,88	4,62	9,89
	14	0	0,22	0	0	2,6	0	0	0	0	0	4,85	18,01	10,98	41,04	5,88

4.3 Mapeamentos das FTs usando os classificadores SAM e DE

Para facilitar a interpretação, as classes mapeadas pelas 14 AGs foram aglutinadas em seis classes: Cc/Cc; Cc/Rt; Cx/Cc; Cx/Cx; Cx/Rt; Rt/Rt. A classifica-

ção usando a DE gerou agrupamentos maiores, mais contínuos e menos fragmentados do que os obtidos com o SAM. Observou-se um predomínio do relevo de transição (Cx/Cc) na classificação SAM e de um relevo retilíneo (Rt/Rt) para a classificação DE (Figura 12).

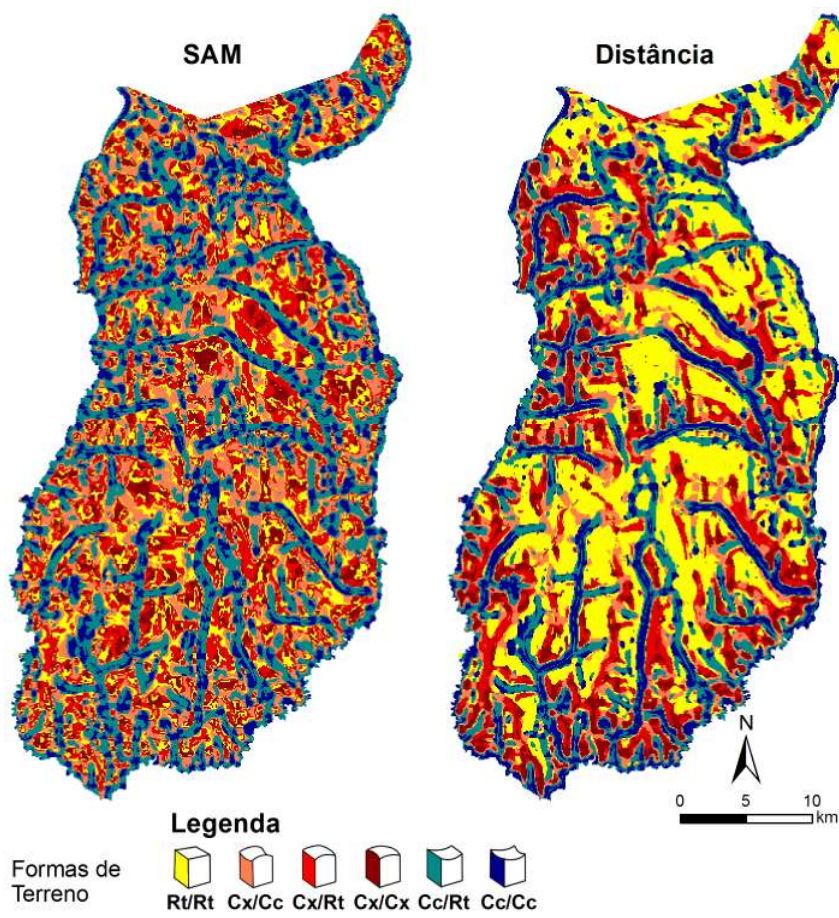


Figura 12 - Resultados do mapeamento das seis FTs utilizando os métodos SAM e DE, a partir do agrupamento das classes de AGs: Rt/Rt (AG-1 e AG-8), Cx/Cc (AG-2 e AG-11), Cx/Rt (AG-3 e AG-7), Cx/Cx (AG-4 e AG-9), Cc/Rt (AG-5, AG-12 e AG-14), e Cc/Cc (AG-6, AG-10 e AG-13).

A tabela 3 lista a estatística referente à porcentagem de área, altimetria e declividade para as formas de terreno obtidas pelos métodos SAM e DE. Na classificação SAM, a classe Cc/Rt foi a mais representativa (26,64%), seguida pelas formas Cx/Rt e Cx/Cc (18,56% e 17,68% respectivamente) (Tabela 3). Vasconcelos *et al.* (2012) identificaram as mesmas classes predominantes em seu estudo usando o classificador SAM. Por outro lado, as classes minoritárias foram Rt/Rt (14,39%), Cc/Cc (12,21%) e Cx/Cx (10,51%). Nesta classificação, o ponto mais elevado da

área de estudo foi representado pela classe Cx/Rt (1044 m) e o mais baixo, pela classe Cc/Rt (815 m). A classe Cx/Cx apresentou a maior média altimétrica da área de estudo, estando localizada em pequenas áreas isoladas de relevo remanescente. Esta classe apresentou também a menor média de declividade (1,90 graus), demonstrando que as áreas mapeadas pelo SAM são os divisores de bacias com topos suaves. As classes do SAM com as maiores médias de declividade foram as seguintes feições côncavas: Cc/Rt (2,58 graus) e Cc/Cc (2,54 graus).

Tabela 3: Estatística de altimetria e declividade para as formas de terreno usando o classificador SAM e a DE.

SAM									
Forma de Terreno	Área %	Altimetria (metros)				Declividade (°)			
		Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Côncavo/Côncavo	12,21	816	1010	897,89	34,42	0	12,13	2,54	1,49
Côncavo/Retilíneo	26,64	815	1017	905,40	35,74	0	13,32	2,58	1,55
Convexo/Côncavo	17,68	819	1029	929,02	34,59	0	12,50	2,21	1,36
Convexo/Convexo	10,52	835	1036	943,11	34,23	0	14,24	1,90	1,09
Convexo/Retilíneo	18,56	830	1044	940,22	33,42	0	14,47	1,93	1,14
Retilíneo/Retilíneo	14,39	830	1033	940,17	32,43	0	13,91	2,01	1,20
DE									
Forma de Terreno	Área %	Altimetria (metros)				Declividade (°)			
		Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão	Mínimo	Máximo	Média	Desvio Padrão
Côncavo/Côncavo	15,09	815	1010	892,80	33,47	0	12,46	2,76	1,67
Côncavo/Retilíneo	18,62	815	1017	904,31	35,16	0	13,32	2,60	1,54
Convexo/Côncavo	12,12	820	1029	928,96	35,98	0	12,50	2,32	1,47
Convexo/Convexo	10,13	835	1044	934,56	37,93	0	14,24	2,17	1,36
Convexo/Retilíneo	13,83	830	1033	940,04	33,38	0	14,47	2,08	1,36
Retilíneo/Retilíneo	30,22	834	1024	939,16	30,91	0	11,06	1,81	0,81

Na classificação por DE, a maior FT foi a Rt/Rt (30,22%) seguida pela Cc/Rt (18,62%) (Tabela 3). Em contraposição, as menores FTs foram: Cx/Cx (10,13%), Cx/Cc (12,12%) e Cx/Rt (13,83%). O ponto mais alto da área de estudo na classificação DE foi a FT Cx/Cx (835 m), mesmo resultado obtido pelo SAM. O valor mínimo de altimetria (815 m) apareceu em duas FTs: Cc/Cc e Cc/Rt. A FT Cx/Rt apresentou a maior média de altitude (940 m). A FT Rt/Rt, com maior extensão, apresentou menor desvio padrão de altimetria (30,91), menor média de declividade (1,81 graus) e menor desvio padrão de declividade (0,81), expressando o padrão plano deste relevo. Cc/Cc e Cc/Rt apresentaram as maiores médias de declividade (2,76 graus e 2,60 graus respectivamente), assim como na classificação por SAM.

A tabela 4 lista a tabulação cruzada entre os dois mapeamentos com as FTs, onde os dados se apre-

sentam normalizados para 100% ao longo da coluna descrita pelo método SAM. Apenas, 52,27% dos pixels permaneceram com a mesma FT nos dois métodos de classificação. As FTs associadas às drenagens foram similares nas duas classificações. As classes que menos se modificaram entre as duas classificações foram a Cc/Cc (76,81% de áreas inalteradas nas duas classificações) e a Cc/Rt (59,75%). Nestas duas classes, as mudanças se mantiveram dentro do formato côncavo, onde 21,47% da FT Cc/Rt classificada pelo método SAM passou a representar Cc/Cc no método DE e, similarmente, 16,6% de Cc/Cc passou a representar Cc/Rt.

As outras quatro classes tiveram uma sobreposição menor que 50% na comparação entre os dois classificadores. Grande parte das áreas mapeadas como formas convexas (Cx/Cx e Cx/Rt) na classificação SAM passaram a ser Rt/Rt com a DE.

Tabela 4: Tabulação cruzada entre as classificações com seis classes pelo método SAM e DE. Os valores estão expressos em porcentagem (%).

	Forma de Terreno	SAM					Total	
		Cc/Cc	Cc/Rt	Cx/Cc	Cx/Cx	Cx/Rt		Rt/Rt
DE	Cc/Cc	76,81	21,47	0	0	0	0	15,08
	Cc/Rt	16,6	59,75	3,73	0	0	0	18,57
	Cx/Cc	0	3,22	49,77	0	1,15	15,66	12,12
	Cx/Cx	0	0	2,52	44,10	15,08	15,45	10,12
	Cx/Rt	0	0	1,48	13,23	42,69	29,73	13,88
	Rt/Rt	6,59	15,56	42,50	42,67	41,09	39,16	30,23

4.4 Comparação entre os métodos a partir da visualização em 3D e reconhecimento de campo

Em ambos os métodos as drenagens foram bem evidenciadas em padrões alongados e apresentaram predomínio de Cc/Rt e Cc/Cc, mostrando que essas FTs devem estar associadas aos solos hidromórficos. As FTs Rt/Rt e Cx/Cc da classificação por DE mostraram-se associadas principalmente às rampas de colúvio, onde pode haver um predomínio de Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo.

As FTs geradas pelo método DE evidenciaram o padrão de dissecação das chapadas. Observa-se uma frente de recuo erosiva mais abrupta nas cabeceiras da porção oeste da área de estudo com formas Cx/Cx e Cx/Rt no limite entre o Rt/Rt mais a montante e entre o Cc/Rt ou Cc/Cc mais a jusante, como observado em campo (Figura 13). Esse padrão não fica evidente na classificação pelo método SAM, pois o classificador não identifica vertentes retilíneas como o DE (Figura 14).

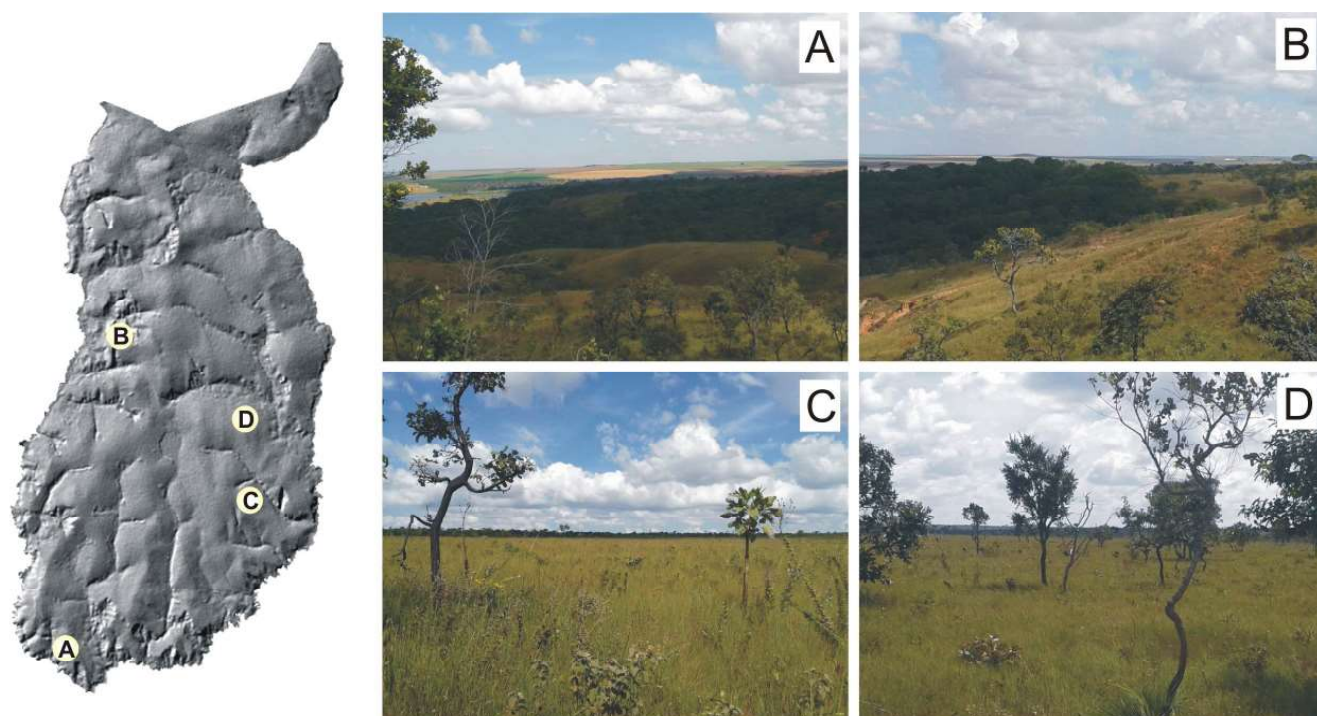


Figura 13 – Padrões de FTs encontrados na área de estudo. Áreas próximas às cabeceiras de drenagem exibem um padrão de drenagem encaixada com intercalações entre FTs côncavas e convexas (A e B). As porções mais altas apresentam grandes áreas planas com padrões de FT retilíneos (C e D). Fotos: Antônio Felipe Couto Júnior.

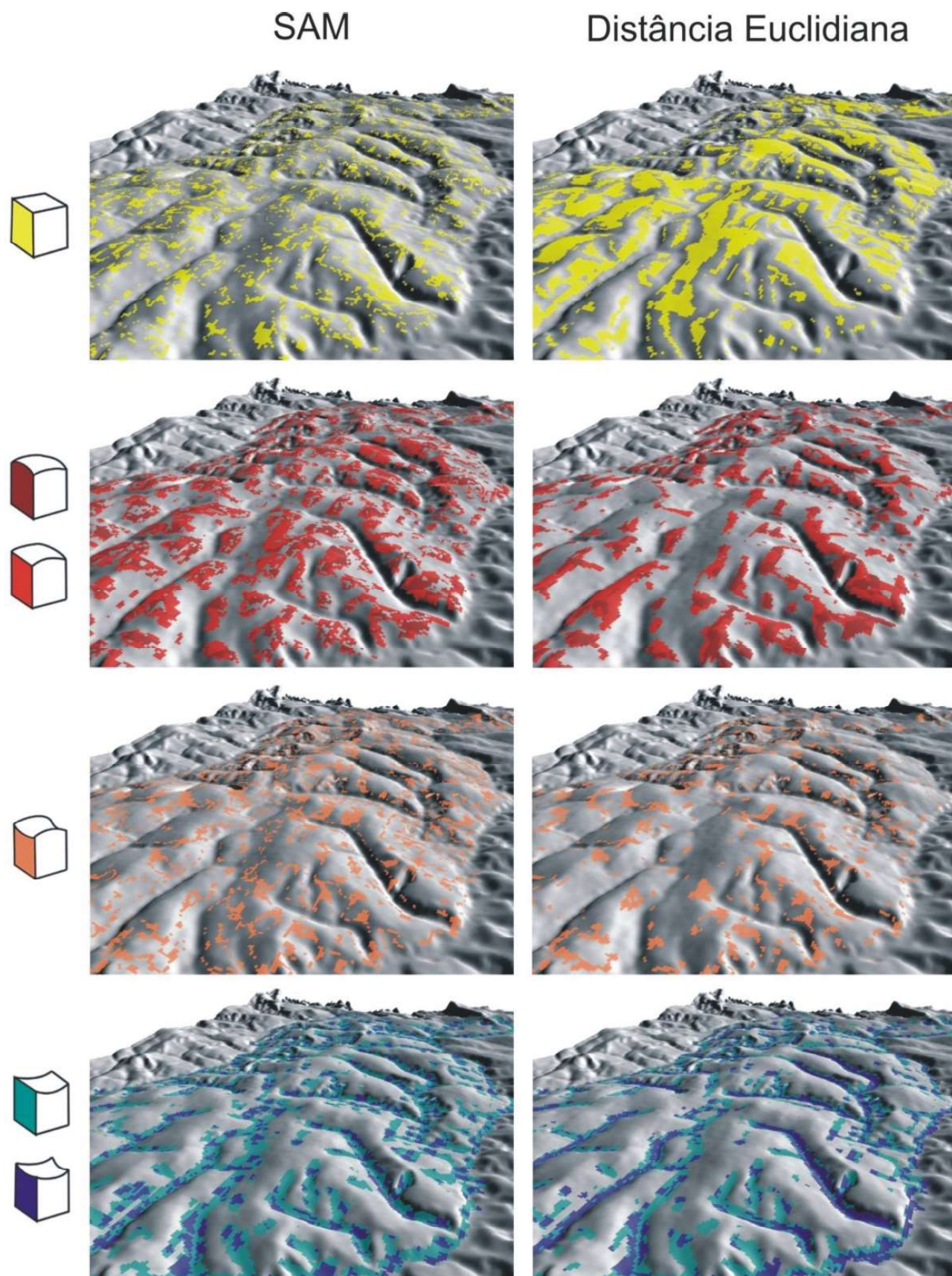


Figura 14 - Comparação entre os resultados da classificação com SAM (esquerda) e com DE (direita) para as FTs separadas com visualização em 3D.

A figura 15 representa a média e desvio padrão das classes de FT por curvatura. Observou-se na curva de tendência que os valores médios apresentaram maiores amplitudes entre as classes de FT classificadas por DE, indicando que a variação entre as FTs está melhor demarcada. Os valores médios das FTs do SAM apresentaram pouca amplitude entre as formas Cx/Cc, Cx/Cx, Cx/Rt e Rt/Rt e com valores de desvio padrão similares, o que corroborou para uma classificação mais confusa e fragmentada no topo da paisagem. Diferentemente, as formas Cc/Cc e Cc/Rt e Cx/Cc apresentaram valores médios sempre crescentes de Cc/Cc à Cx/Cc individualizando as FTs que indicam vales, talwegues e depressões. É importante destacar que os valores médios e de desvio padrão foram similares entre as duas classificações para esse conjunto de FTs (Cc/Rt, Cc/Cc e Cx/Cc), haja vista similaridade do resultado da tabulação cruzada entre os dois classificadores para essas FTs. Os resultados estão associados ao padrão geomorfológico da área com um

predomínio de divisores de drenagem com padrão plano a suavemente ondulado com vertentes retilíneas associados aos vales côncavos encaixados (DANTAS, 2003).

A transição entre o Cx/Cc e o Cx/Cx estabeleceu a porção da paisagem entre o relevo côncavo e convexo. Ambas as classificações apresentaram valores médios inferiores para a classe Cx/Cc em comparação ao Cx/Cx. Entretanto, a transição entre essas classes observadas na curvatura máxima apresentou pouca variação do valor médio na classificação SAM enquanto que a mesma transição apresentou amplitude do valor médio bem marcada pela curva de tendência na classificação DE (Figura 15).

Os valores menores de desvio padrão para todas as curvaturas na classificação por DE em comparação com o SAM reforçam que a FT Rt/Rt não foi superestimada. Essa constatação foi importante, haja vista que a classificação por DE apresentou mais homogeneidade no relevo pela a ampla dominância do Rt/Rt (Figura 15).

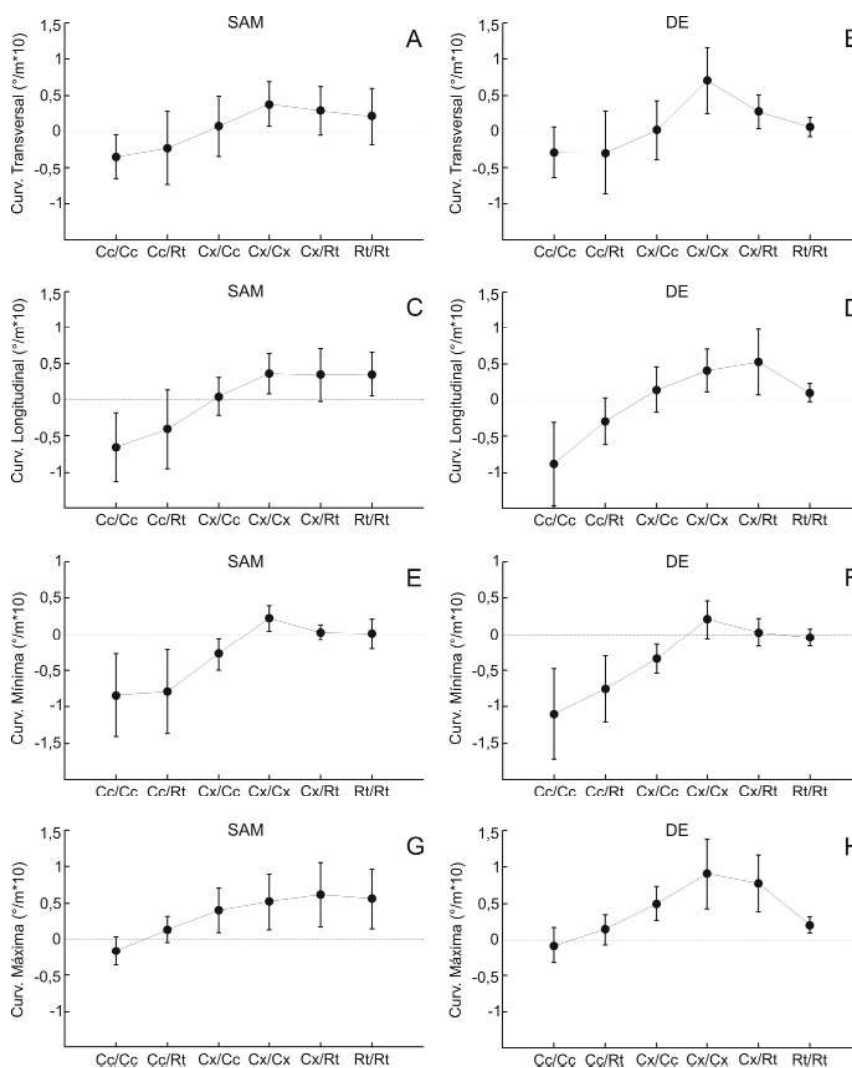


Figura 15 – Média e Desvio Padrão dos valores de curvatura para cada FT: curvatura transversal para a classificação SAM (A) e DE (B); curvatura longitudinal para SAM (C) e DE (D); curvatura mínima para SAM (E) e DE (F); e curvatura máxima para SAM (G) e DE (H).

5. Considerações Finais

Apesar da ampla utilização de classificadores a partir de assinaturas geomorfométricas, comparações entre as métricas ainda não haviam sido abordadas na literatura para a detecção das formas de terreno. Destaca-se no método de DE a eficiência de classificar o relevo plano de forma contínua. Diferentemente no método SAM, que têm nestas áreas a sua maior dificuldade, pois tende a substituir as áreas planas por topos Cx/Cx e Cx/Rt. Os dois métodos são eficientes e similares de acordo com o resultado da tabulação cruzada para classificar o desenho hidrológico da área de estudo ressaltados pelos canais de drenagem. Entretanto, a DE se mostrou mais eficiente, demonstrado pela curva de tendência dos valores médios de cada classe de FT em cada curvatura individualizada. A amplitude entre os valores médios evita uma classificação fragmentada como foi observado no SAM. Esta classificação mais fragmentada traz prejuízo para a identificação de feições geomorfológicas, principalmente onde estão localizados os rebordos erosivos da área de estudo.

A replicação dessa metodologia para outras áreas é totalmente possível, mas alguns parâmetros como o tamanho da janela precisam ser considerados e, talvez reavaliados, pois dependem das características do relevo da região a ser analisada. Além disso, a classificação ainda precisa ser analisada com outros tipos MDE, como ASTER DEM ou produtos derivados de imagens estereoscópicas, mas sempre considerando que essas imagens podem apresentar ruídos que precisam passar por um pré-processamento. MDEs com maiores resoluções espaciais também podem ser utilizados, porém quanto maior a resolução espacial, maior é a possibilidade da influência de detalhes que não refletem o relevo da região. Nesse sentido, a utilização das imagens disponíveis, como as do Hydrosheds, facilita o estudo e a replicação da metodologia na escala regional, já que é um dado previamente tratado.

Na geomorfologia ainda se tem preferência em classificar o relevo em grandes compartimentos decorrente do entendimento de forma regionalizada, porém a informação sobre as classes de formas de terreno podem detalhar superfícies de erosão ativas, cabeceiras, assimetria entre vertentes, relevos residuais e tantos outros. Podem ainda auxiliar na escolha de áreas representativas para estudos acerca da relação solo-paisagem a partir da observação da organização das FTs nas vertentes.

Referências Bibliográficas

- ADEDIRAN, O.H.; PARCHARIDIS, I.; POSCOLIERI, M.; PAVLOPOULOS, K. Computer-assisted discrimination of morphological units on northcentral Crete (Greece) by applying multivariate statistics to local relief gradients. **Geomorphology**, v. 58, p. 357–370, 2004.
- 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.
- BARBIERI, D.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos químicos de um Argissolo para aplicação de insumos à taxa variável em diferentes formas de relevo. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 4, p. 645-653, 2008.
- BISPO, P.C; VALERIANO, M.M; KUPLICH, T.M. Relação entre as variáveis morfométricas extraídas de dados SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) e a vegetação do Parque Nacional de Brasília. **Acta Botânica Brasilica**, v. 24, n. 1, p. 96-103. 2010.
- BLASZCZYNSKI, J.S. Landform characterization with Geographic Information Systems. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 63, n. 2, p. 183-191, 1997.
- BOARDMAN, J.W.; KRUSE, F.A.; GREEN, R. O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. In: Summaries of Fifth Annual JPL Airborne Earth Science Workshop, R. O. Green, ed., pp. 23–26, 1995.
- BOARDMAN, J.W.; KRUSE, F.A. Automated spectral analysis a geological example using AVIRIS data, North Grapevine, Mountains, Nevada. **Proceedings of the Tenth Thematic Conference on Geological Remote Sensing**. San Antonio: [s.n.]. 1994. p. 407-418.
- BOLONGARO-CREVENNA, A.; TORRES-RODRIGUEZ, V.; SORANI, V.; FRAME, D.; ORTIZ, M.A. Geomorphometric analysis for characterizing landforms in Morelos State, Mexico. **Geomorphology**, v. 67, p. 407–422, 2005.
- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Secretaria Geral. Projeto RADAMBRASIL. **Folha SD-23, Brasília; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra**. Rio de Janeiro, 1982. 660p. il. 5 mapas (Levantamento de Recursos Naturais v.29)
- BRAUN, O.P.G. Contribuição à geomorfologia do Brasil Central. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 32, n. 3, p. 3-39, 1971.

- BROWN, D.G.; LUSCH, D.P.; DUDA, K.A. Supervised classification of types of glaciated landscapes using digital elevation data. **Geomorphology**, v. 21, n. 3–4, p. 233–250, 1998.
- BUE, B. D.; STEPINSKI, T. F. Automated classification of landforms on Mars. **Computers & Geosciences**, v. 32, n. 5, p. 604-614, 2006.
- BURROUGH, P.A.; VAN GAANS, P.F.M.; HOOTSMANS, R. Continuous classification in soil survey: spatial correlation, confusion and boundaries. **Geoderma**, v. 77, p. 115–135, 1997.
- 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, p. 37–52, 2000.
- CAMARGO, L.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Spatial variability of physical attributes of an Alfisol under different hillslope curvatures. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 617-630, 2010.
- CAMPOS, J.E.G.; MONTEIRO, C.F.; RODRIGUES, L.N. Geologia e zoneamento hidrológico da bacia do Rio Preto. **Documentos / Embrapa Cerrados**, 172, 54 p, 2006.
- CARVALHO JÚNIOR, O.A.; MENESES, P.R. Spectral Correlation Mapper (SCM): an improving on the Spectral Angle Mapper (SAM). **Proceedings of the Ninth JPL Airborne Earth Science Workshop**, JPL Publication 00-18. pp. 65-74, 2000.
- CARVALHO JÚNIOR, O.A.; CARVALHO, A.P.F.; MENESES, P.R.; GUIMARÃES, R.F. Classificação e eliminação dos ruídos em imagens hiperespectrais pela análise sequencial da transformação por fração de ruído mínima. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 20, n. 1, p. 31-41, 2003.
- CARVALHO JÚNIOR, O.A.; COELHO, M.A.N.; MARTINS, E.S.; GOMES, R.A.T.; COUTO JUNIOR, A.F.; OLIVEIRA, S.N.; SANTANA, O.A. Mapeamento da vegetação na floresta Atlântica usando o classificador de árvore de decisão para integrar dado de sensoriamento remoto e modelo digital de terreno. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 26, p. 331-345, 2008.
- CARVALHO JÚNIOR, O.A.; COUTO JÚNIOR, A.F.; SILVA, N.C.; MARTINS, E.S.; CARVALHO, A.P.F.; GOMES, R.A.T. Avaliação dos classificadores espectrais de Mínima Distância Euclidiana e Spectral Correlation Mapper em séries temporais NDVI-MODIS no Campo de Instrução de Formosa (GO). **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 61, n. 04, p. 399-412, 2009.
- CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GUIMARÃES, R.F.; GILLESPIE, A.R.; SILVA, N.C.; GOMES, R.A.T. A New Approach to Change Vector Analysis Using Distance and Similarity Measures. **Remote Sensing**, v. 3, p. 2473-2493, 2011.
- CHAGAS, C.S.; FERNANDES FILHO, E.I.; BHERING, S.B. Relação entre atributos do terreno, material de origem e solos em uma área no noroeste do estado do Rio de Janeiro. **Sociedade & Natureza**, v. 25, p. 147-162, 2013.
- COUTO JUNIOR, A.F.; SOUZA, V.V.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; MARTINS, E.S.; SANTANA, O.A.; FREITAS, L.F.; GOMES, R.A.T. Integração de Parâmetros Morfométricos e Imagem ASTER para a Delimitação das Fitofisionomias da Serrada Canastra, Parque Nacional da Serra da Canastra, MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 11, n. 1, 2010.
- DANTAS, M.E. Geomorfologia. In: CPRM; EMBRAPA; SCOMI **Zoneamento ecológico-econômico da região integrada de desenvolvimento do Distrito Federal: fase I**. Rio de Janeiro: [s.n.], v. 2, 2003. p. 1-29.
- DIKAU, R. The application of a digital relief model to landform analysis in geomorphology. In: Raper, J. (Ed.), **Three Dimensional Applications in Geographic Information Systems**. Taylor and Francis, London, 1989, pp. 51–77
- DRĂGUȚ, L.; BLASCHKE, T. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. **Geomorphology**, v. 81, p. 330-344, 2006.
- DRĂGUȚ, L.; EISANK, C. Object representations at multiple scales from digital elevation models. **Geomorphology**, v.129, p.183-189, 2011.
- EHSANI, A.H.; QUIEL, F. A semi-automatic method for analysis of landscape elements using Shuttle Radar Topography Mission and Landsat ETM+ data. **Computers & Geosciences**, v.35, p.373-389, 2009.
- EHSANI, A.H.; QUIEL, F. Geomorphometric feature analysis using morphometric parameterization and artificial neural networks. **Geomorphology**, v.99, p.1-12, 2008.
- EHSANI, A.H.; QUIEL, F.; MALEKIAN, A. Effects of SRTM resolution on morphometric feature identification using neural network – self organizing map. **Geoinformatica**, v.14, p.405-424, 2010.
- EVANS, I.S. **General geomorphology, derivatives of altitude and descriptive statistics**. In: Chorley, R.J. (Ed.), **Spatial Analysis in Geomorphology**. Methuen & Co. Ltd, London, pp. 17–90. 1972.
- EVANS, I.S. Geomorphometry and landform mapping: what is a landform? **Geomorphology**, v. 137, p. 94-106, 2012.

- FONSECA, M.S.; SILVA JÚNIOR, M.C. Fitossociologia e similaridade florística entre trechos de Cerrado sentido restrito em interflúvio e em vale no Jardim Botânico de Brasília, DF. **Acta Botânica Brasilica**, v. 18, n. 1, p. 19-29, 2004.
- GOMES, R.A.T.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; FERNANDES, N.F.; VARGAS JÚNIOR, E.; MARTINS, E.S. Identification of the affected areas by mass movement through a physically based model of landslide hazard combined with an empirical model of debris flow. **Natural Hazards** (Dordrecht), v. 45, p. 197-209, 2008.
- GOMES, R.A.T.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; FERNANDES, N.F.; VARGAS JÚNIOR, E. Combining Spatial Models for Shallow Landslides and Debris-Flows Prediction. **Remote Sensing**, v. 5, p. 2219-2237, 2013.
- GREEN, A.A.; BERMAN, M.; SWITZER, P.; CRAIG, M.D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 1, p. 65-74, 1988.
- GRAFF, L.H.; USERY, E.L. Automated classification of generic terrain features in digital elevation models. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 59, p. 1409-1417, 1993.
- GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; MARTINS, E.S.; OLIVEIRA, S.N.; FERNANDES, N.F. Análise temporal das áreas susceptíveis a escorregamentos rasos no Parque Nacional da Serra dos Órgãos (RJ) a partir de dados pluviométricos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, p. 192-200, 2009.
- IRVIN, B.J.; VENTURA, S.J.; SLATER, B.K. Fuzzy and isodata classification of landform elements from digital terrain data in Pleasant Valley, Wisconsin. **Geoderma**, v. 77, p. 137-154, 1997.
- IWAHASHI, J.; PIKE, R.J. Automated classification of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a tree-part geometric signature. **Geomorphology**, v. 86, p. 409-440, 2007.
- JARVIS, A.; RUBIANO, J.; NELSON, A.; FARROW, A.; MULLIGAN, M. **Practical use of SRTM data in the tropics: comparisons with digital elevation models generated from cartographic data**. Cali: Centro Internacional de Agricultura Tropical, 2004. 31p.
- JASIEWICZ, J.; STEPINSKI, T.F. Geomorphons – a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. **Geomorphology**, v. 183, p. 147-156, 2013.
- KING, L.C.A Geomorfologia do Brasil Central. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 147-265, 1956.
- KLINGSEISEN, B.; METTERNICHT, G.; PAULUS, G. Geomorphometric landscape analysis using a semi-automated GIS-approach. **Environmental Modelling & Software**, v. 23, p. 109-121, 2008.
- KRUSE, F.A.; LEFKOFF, A.B.; BOARDMAN, J.W.; HEIDBRECHT, K.B.; SHAPIRO, A.T.; BARLOON, P.J.; GOETZ, A.F.H. The spectral image processing system (SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. **Remote Sensing of Environment**, v. 44, p. 437-456. 1993.
- LEÃO, M.G.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; SIQUEIRA, D.S.; PEREIRA, G.T. Terrain forms and spatial variability of soil properties in an area cultivated with citrus. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 4, p. 643-651, 2011.
- LEHNER, B.; VERDIN, K.; JARVIS, A. **HydroSHEDS Technical Documentation**. World Wildlife Fund US, Washington, DC. 2006, 26 p. Disponível em: <http://hydrosheds.cr.usgs.gov>.
- LIMA, L.A.S.; MARTINS, E.S.; REATTO, A.; CASTRO, K.B.; VASCONCELOS, V.; CARVALHO JUNIOR, O.A. Compartimentação Geomorfológica e suas relações com os solos na Bacia do Alto rio Preto, GO. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento - CPAC**, Planaltina, DF, v. 255, p. 24, 2009.
- LUEDELING, E.; SIEBERT, S.; BUERKERT, A. Filling the voids in the SRTM elevation model - A TIN-based delta surface approach. **Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 62, p. 283-294, 2007.
- MACEDO, J.; BRYANT, R.B. Morphology, Mineralogy and Genesis of a Hydrosequence os Oxisols in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 52, n. 3, p. 689-698, 1987.
- MACMILLAN, R.A.; PETTAPECE, W.W.; NOLAN, S.C.; GODDARD, T.W. A generic procedure for automatically segmenting landforms into landform elements using DEMs, heuristic rules and fuzzy logic. **Fuzzy Sets and Systems**, v. 113, p. 81-109, 2000.
- MACMILLAN, R.A.; SHARY, P. A. Landforms and Landform Elements in Geomorphometry. In: HENGL, T.; REUTER, H.I. **Geomorphometry: Concepts, Software, Applications**. Elsevier, v. 33, 2009. Cap. 9, p. 227-254.
- MACKAY, D.S.; ROBINSON, V.B.; BAND, L.E. Classification of higher order topographic objects on digital terrain data. **Computers, Environment and Urban Systems**, v. 16, p. 473-496, 1992.

- MARTINS, E.S. **Petrografia, mineralogia e geomorfologia de rególitos lateríticos no Distrito Federal**. Tese, Doutorado em Geologia. Universidade de Brasília. Brasília, DF. 2000.
- MARTINS, E.S.; REATTO, A.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GUIMARÃES, R.F. **Evolução geomorfológica do Distrito Federal**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, (Documentos, n. 122), 2004, 57 p.
- MENESES, P.R.; SANO, E.E. Classificação pixel a pixel de imagens. In: MENEZES, P. R.; ALMEIDA, T. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. v. 1, 2012. Cap. 12, p. 191-206.
- MENKE, A.B.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; OLIVEIRA, S.N. classificação pelo método k-médias das bacias de drenagem do rio Ipanema (AL/PE) considerando os atributos morfométricos. **Geo UERJ**, v. 2, p. 1-20, 2013.
- MILIAREISIS, G.; ILIOPOULOU, P. Clustering of Zagros Ranges from the Globe DEM representation. **International Journal of Applied Earth Observation and GeoInformation**, v. 5, n. 1, p. 17-28, 2004
- OLIVEIRA, S.N.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; SILVA, T.M.; GOMES, R.A.T.; MARTINS, E.S.; GUIMARÃES, R.F.; SILVA, N.C. Delimitação automática de bacias de drenagens e análise multivariada de atributos morfométricos usando modelo digital de elevação hidrológicamente corrigido. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 8, p. 3-21, 2007.
- PENTEADO, M.M. Tipos de concreções ferruginosas nos compartimentos geomorfológicos do Planalto de Brasília. **Notícia Geomorfológica**, Campinas, v. 16, n. 32, p. 39-53, 1976.
- PIKE, R.J.; ROZEMA, W.J. Spectral Analysis of Landforms. **Annals of the Association of American Geographers**, v. 65, p. 499-516. 1975.
- PIKE, R.J. Geomorphometry - diversity in quantitative surface analysis. **Progress in Physical Geography**, v. 24, n. 1, p. 1-20. 2000.
- PIKE, R.J. The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from Digital Elevation Models. **Mathematical Geology**, v. 20, n. 5, p. 491-511, 1988.
- PIKE, R.J.; EVANS, I.S.; HENGL, T. Geomorphometry: A Brief Guide. In: HENGL, T.; REUTER, H. I. **Geomorphometry: Concepts, Softwares, Applications**. 1º Edição. ed. Amsterdam: Elsevier, v. 33, 2009. Cap. 1, p. 3-30.
- RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The shuttle radar topography mission: a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 57, p. 241-262, 2003.
- REATTO, A.; BRUAND, A.; MARTINS, E.S.; MULLER, F.; SILVA, E.M.; CARVALHO JUNIOR, O.A.; BROSSARD, M.; RICHARD, G. Development and origin of the microgranular structure in Latosols of the Brazilian Central Plateau: Significance of texture, mineralogy, and biological activity. **Catena**, v. 76, p. 122-134, 2009.
- REU, J.; BOURGEOIS, J.; BATS, M.; ZWERTVAEGHER, A.; GELORINI, V.; SMEDT, P.D.; CHU, W.; ANTROP, M.; MAEYER, P.D.; FINKE, P.; MEIRVENNE, M.V.; VERNIERS, J.; CROMBÉ, P. Application of the topographic position index to heterogeneous landscapes. **Geomorphology**, v.186, p.39-49, 2013.
- SAHA, K.; WELLS, N.A.; MUNRO-STASIUK, M. An object-oriented approach to automated landform mapping: A case study of drumlins. **Computers & Geosciences**, v.37, p.1324-1336, 2011.
- SCHMIDT, J.; HEWITT, A. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. **Geoderma**, v. 121, n.3, p. 243-256, 2004.
- SCISLEWSKI, G.; FRASCA, A.A.S.; ARAÚJO, V.A.; RODRIGUES, J.B.; GONÇALVES, H.S. Geologia. In: CPRM; EMBRAPA; SCO-MI **Zoneamento Ecológico-Econômico da Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno FASE I**. Rio de Janeiro: [s.n.], v. 1, 2003. p. 9-15.
- SILVA, F.A.M; ASSAD, E.D; EVANGELISTA, B.A. Caracterização Climática do Bioma Cerrado. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P.; RIBEIRO, J.F. **Cerrado: Ecologia e Flora**. [S.l.]: Embrapa, v. 1. Cap. 3, p. 71-88. 2008.
- SODRÉ, R.V.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; MACHADO, W.P.; OLIVEIRA, S.N.; GOMES, R.A.T.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO, A.P.F.; MARTINS, E.S. Classificação de Bacias de Drenagem do Alto Jequitai (Minas Gerais) a partir da análise de Principais Componentes e Análise de Grupos. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, p. 73-86, 2007.
- VAN ZYL, J.J. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM): a breakthrough in remote sensing of topography. **Acta Astronautica**, v. 48, n. 5, p. 559-565, 2001.
- VASCONCELOS, V.; CARVALHO JUNIOR, O.A; 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.

WOOD, J. **The geomorphological characterization of Digital Elevation Models**. Ph.D. Thesis, Department of Geography, University of Leicester, UK, 1996.

YOUNG M. Terrain analysis: program documentation. Report 5 on Grant DA-ERO-591-73-G0040, **Statistical characterization**

of altitude matrices by computer. Department of Geography, University of Durham, England. 27 p, 1978

ZEVENBERGEN, L.W.; THORNE, C.R. Quantitative analysis of land surface topography. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 12, p. 47-56, 1987.