



**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

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

**JOÃO PAULO SENA SOUZA**

**BRASÍLIA, DF**  
**JANEIRO/2015**

**JOÃO PAULO SENA SOUZA**

**Dissertação de Mestrado**

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

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Geografia, área de concentração em Geoprocessamento

Orientador: Dr. Éder de Souza Martins

Co-orientador: Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior

**BRASÍLIA, DF  
JANEIRO/2015**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS HUMANAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA**

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

**João Paulo Sena-Souza**

Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Geografia, área de concentração em Geoprocessamento

**Aprovado por:**

---

Éder de Souza Martins, Doutor (Embrapa Cerrados – CPAC)  
(Orientador)

---

Osmar Abílio de Carvalho Júnior, Doutor (Universidade de Brasília – UnB)  
(Co-Orientador)

---

Renato Fontes Guimarães, Doutor (Universidade de Brasília – UnB)  
(Examinador Interno)

---

Edson Eyji Sano, Doutor (Embrapa Cerrados – CPAC)  
(Examinador Externo)

**Brasília, DF**  
**29 de janeiro de 2015**

## CESSÃO DE DIREITOS

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósito acadêmico e científico. O Autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

---

João Paulo Sena Souza

## DEDICATÓRIA

**Aos meus pais, Maria de Fátima Sena Souza  
e Antônio Joaquim de Souza Neto.**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço pela contribuição na realização desse trabalho:

- Ao Dr. Éder de Souza Martins, pela excelente orientação e pelos ensinamentos sobre ciência e sobre a vida.
- Ao Dr. Osmar Abílio de Carvalho Júnior, pelas orientações e disposição constante em ensinar.
- Ao Dr. Antônio Felipe Couto Júnior, um grande orientador e amigo que sempre mostra o caminho da ciência e por ter sido o Professor que me fez ter grande interesse sobre a paisagem e as geotecnologias.
- Ao Vinícius Vasconcelos, um grande amigo geocientista, pelas orientações certas na construção desse trabalho e pelos conselhos tranquilizadores sobre a academia e sobre a vida.
- Ao Dr. Renato Fontes Guimarães, por fazer parte da banca examinadora, suas contribuições e pela disposição em tirar as dúvidas que surgem no dia a dia do laboratório.
- Ao Dr. Edson Eyji Sano, pela gentileza em fazer parte da banca examinadora e suas contribuições.
- Ao Departamento de Geografia da Universidade de Brasília.
- Ao Dr. Roberto Arnaldo Trancoso Gomes, por me acolher no Laboratório de Sistema de Informações Espaciais – LSIE e pela prontidão para ensinar e tirar dúvidas.
- À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa recebida nesse período.
- Aos amigos Tiago Kisaka, Ray, Glauber e Fábio, pelos incentivos, ensinamentos e conversas construtivas.
- Ao José Mateus Sena Souza, meu irmão e melhor amigo, pela paciência de escutar nos momentos de dificuldade e empurrar pra frente nas horas de desânimo e estagnação.
- À Mayanna da Silva Santos Souza, linda esposa, pelo carinho, paciência e compreensão nesse período e por sempre incentivar o meu crescimento pessoal e profissional.

Meus sinceros agradecimentos.

## RESUMO

O Bioma Cerrado apresenta a maior biodiversidade e heterogeneidade de paisagens entre as savanas do mundo. Essa abrangência evidencia a importância de estudos sistemáticos sobre os diversos aspectos desse domínio. Na região central desse bioma encontra-se a ecorregião do Planalto Central, onde o relevo norteia a dinâmica evolutiva da paisagem. Está associado à distribuição espacial dos tipos de solo e dos organismos vivos, incluindo as atividades humanas. Esse elemento da paisagem pode ser estudado de forma qualitativa ou quantitativa. A geomorfometria é o campo da ciência que estuda de forma quantitativa o relevo, principalmente as formas de terreno. Dentre os métodos de classificação das formas do terreno destaca-se a classificação supervisionada pelo emprego de assinaturas geomorfométricas de referência. A classificação por assinaturas geomorfométricas pode utilizar métricas de similaridade e distância. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é comparar os métodos de classificação utilizando métricas de similaridade e de distância no mapeamento das formas de terreno, aplicados na área do Campo de Instrução Militar de Formosa (CIF) localizado na bacia do Rio Preto. A metodologia possui as seguintes etapas: aquisição dos dados HydroSHEDS, geração das imagens de curvaturas, seleção das assinaturas geomorfométricas de referência; classificação pelo método SAM e Distância Euclidiana; comparação dos resultados usando tabulação cruzada. Para a definição das assinaturas geomorfométricas foi elaborada uma imagem unindo os conjuntos de curvaturas Longitudinal e Transversal, Mínima e Máxima. A detecção das assinaturas de referência adotou as seguintes etapas: (a) redução da quantidade de informações espectrais pelo algoritmo *Minimum Noise Fraction* (MNF) que separa a fração sinal do ruído; (b) redução da quantidade de informação espacial selecionando os *pixels* mais puros pelo Índice de Pureza do Pixel (PPI); e (c) seleção das assinaturas geomorfométricas em um visualizador n-dimensional. A classificação das assinaturas foi simplificada nas seis formas de terreno: Convexo/Convexo (Cx/Cx); Côncavo/Côncavo (Cc/Cc); Convexo/Côncavo (Cx/Cc); Côncavo/Retilíneo (Cc/Rt); Convexo/Retilíneo (Cx/Rt); Retilíneo/Retilíneo (Rt/Rt). A classificação foi realizada a partir de 14 assinaturas geomorfométricas. O método SAM evidenciou formas de terreno de transição e côncavas. Por outro lado, o resultado da classificação por distância euclidiana contemplou principalmente os padrões retilíneos. Os resultados mostraram que a distância euclidiana foi mais adequada por mapear principalmente as assinaturas que se aproximam dos valores de curvaturas da área de estudo. Considerando apenas as seis formas de terreno, a comparação pela tabulação cruzada mostrou um aumento na precisão entre os dois métodos, mas os resultados continuaram diferentes. O SAM apresentou um mapeamento com predomínio de formas Cc/Rt, Cx/Rt e Cc/Cx, indicando um terreno heterogêneo com muitas áreas de transição. A distância euclidiana mostrou um terreno com o predomínio das formas Rt/Rt. Esta análise confirmou que a classificação de assinaturas geomorfométricas de referência com o método SAM é mais adequada em relevo fragmentado. Assim, a distância euclidiana foi a classificação mais adequada para o mapeamento das formas de terreno do CIF, que tem um relevo com predomínio de áreas planas e suaves.

**Palavras-Chave:** paisagem, Planalto Central, curvaturas de perfil, assinatura geomorfométrica, classificação supervisionada

## ABSTRACT

The Cerrado has the highest biodiversity and landscapes variety between the savannahs of the world. This range highlights the importance of systematic studies on the various aspects of this field. In the central region of this biome, where the Central Plateau eco-region is located, the relief guides the evolutionary dynamics of the landscape. It is associated with the spatial distribution of soil types and living organisms, including human activities. This landscape element can be studied qualitatively or quantitatively. The geomorphometry is a field of science that studies quantitatively the topographic surface. Among the landform classification methods highlight the supervised classification by use of reference geomorphometric signatures. Geomorphometric signatures classification can use similarity metrics and distance metrics. In this context, the objective of this study is to compare the classification methods using similarity metrics and distance in the landforms mapping, applied in the Campo de Instrução Militar de Formosa (CIF), Rio Preto basin. The methodology has the following steps: acquisition of HydroSHEDS data, generation of curvature images, reference geomorphometric signatures selection; SAM and Euclidean distance classification method; results comparison using cross tabulation. For the definition of geomorphometric signatures was drawn a picture joining the sets of Longitudinal and Cross-sectional curvatures, Minimum and Maximum. The reference signatures detection adopted the following steps: (a) reducing the amount of spectral information by Minimum Noise Fraction algorithm (MNF) separating the fraction noise/ signal; (b) reducing the amount of spatial information by selecting the most pure pixels by the Pixel Purity Index (PPI); and (c) selection of geomorphometric signatures in a n-dimensional viewer. The signatures classification has been simplified in the six landforms: Convex/Convex (Cx/Cx); Convex/Concave; Concave/Concave; Concave/Rectilinear; Convex/Rectilinear; Rectilinear/Rectilinear. Classification was carried out from 14 geomorphometric signatures. The SAM method showed the transition and concave landform. On the other hand, the result of the mainly included the rectilinear patterns. The Euclidean distance classification results showed that the Euclidean distance is more particularly suitable for mapping the signatures that are close to the values of study area curvature. Considering only the six landforms, compared to the cross tabulation showed an increase in accuracy between the two methods, but the results remain different. SAM presented a mapping with predominant forms Cc/Rt, Cx/Rt and Cc/Cx, indicating a heterogeneous terrain with many transition areas. The Euclidean distance showed a plot with the predominance of forms Rt/Rt. This analysis confirmed that the geomorphometric signatures classification to the SAM method is more appropriate in fragmented relief. Thus, the Euclidean distance was the most appropriate classification for the landforms mapping of the the CIF, which has a predominantly flat and smooth relief.

**Keywords:** landscape, Central Plateau, profile curvature, geomorphometric signature, supervised classification

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Localização do CIF no contexto nacional (A), regional com altimetria (metros de altitude) da região do Distrito Federal e entorno (B) e altimetria local (C). .....	25
<b>Figura 2</b> - Representação do relevo da área de estudos por meio dos perfis topográficos A/B e C/D. Cada cor no gráfico do perfil topográfico representa uma forma (Vermelho - Convexo; Azul – Côncavo; Amarelo – Retilíneo). A legenda mostra os tipos de solos mais prováveis para cada forma representada. ....	27
<b>Figura 3</b> - Fluxograma metodológico com as etapas do trabalho.....	28
<b>Figura 4</b> - Representação de uma matriz 3x3 de um Modelo Digital de Elevação com a numeração utilizada por Zevenbergen e Thorne (1987) nas equações que servem de base para os cálculos de curvatura.....	30
<b>Figura 5</b> - Feições morfométricas (a) e as respectivas Formas de Terreno (b). Adaptado de Wood (1996).....	30
<b>Figura 6</b> - Representação do algoritmo SAM em um espaço bidimensional. ....	32
<b>Figura 7</b> - Representação da DE em um espaço bidimensional. ....	33
<b>Figura 8</b> - Curvaturas de perfil apresentadas em valores reais utilizadas no mapeamento das formas de terreno do CIF. É possível observar que estão na mesma ordem de grandeza de valores (entre 0,4 e -0,4°/m aproximadamente). ....	34
<b>Figura 9</b> - Assinaturas Geomorfométricas de referência em formato de “U” selecionadas para o mapeamento das formas de terreno. ....	35
<b>Figura 10</b> - Assinaturas Geomorfométricas de referência em formato de “N” selecionadas para o mapeamento das formas de terreno. ....	35
<b>Figura 11</b> - Imagens de regra geradas para cada assinatura geomorfométrica na classificação pelo método SAM. Cada pixel representa o ângulo em radianos entre a curva de referência e o pixel da imagem de curvatura.....	38
<b>Figura 12</b> - Imagens de regra geradas para cada assinatura geomorfométrica na classificação pela DE. Cada pixel representa o ângulo em radianos entre a curva de referência e o pixel da imagem de curvatura. ....	39
<b>Figura 13</b> - Resultados da classificação da imagem de curvaturas utilizando as 14 assinaturas geomorfométricas. A figura ilustra as principais diferenças entre o resultado da classificação pelo SAM e por DE. A legenda indica o número da assinatura e a forma de terreno que cada uma representa.....	40
<b>Figura 14</b> - Resultados do mapeamento das seis formas de terreno, utilizando o método SAM (esquerda) e a DE (direita).....	43
<b>Figura 15</b> - Comparação entre os resultados da classificação com SAM e com DE para as formas de terreno separadas com visualização em 3D. ....	45

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Valores de das curvaturas em cada assinatura geomorfométrica. Os valores estão em °/m e foram multiplicados por 10 para facilitar a interpretação. ....	35
<b>Tabela 2</b> - Porcentagem de área ocupada por cada classe de assinatura geomorfométrica mapeada. ....	41
<b>Tabela 3</b> - Matriz de Confusão de porcentagem entre a classificação pelo SAM e a distância euclidiana. ....	42
<b>Tabela 4</b> - Estatística descritiva com altimetria e declividade com os resultados do mapeamento das formas de terreno com o classificador SAM e com a distância euclidiana. .	46
<b>Tabela 5</b> - Matriz de Confusão de porcentagem comparando os resultados da classificação de das seis formas de terreno por ângulo espectral (SAM) com a distância euclidiana. O resultado de SAM foi considerado como a imagem real. ....	47

**LISTA DE SIGLAS**

**Cc** – Côncavo

**CIF** – Campo de Instrução Militar de Formosa

**Cx** – Convexo

**DE** – Distância Euclidiana

**MDE** – Modelo Digital de Elevação

**MNF** – *Minimum Noise Fraction*

**PPI** – Índice de Pureza do Pixel

**Rt** – Retilíneo

**SAM** – *Spectral Angle Mapper*

**SCM** - *Spectral Correlation Mapper*

**SIG** – Sistema de Informações Geográficas

**SOM** - *Self Organizing Map*

**SRTM** – *Shuttle Radar Topography Mission*

## SUMÁRIO

RESUMO .....	vii
ABSTRACT .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE SIGLAS .....	xi
<i>CAPÍTULO 1 – APRESENTAÇÃO GERAL</i> .....	13
1.1 INTRODUÇÃO .....	13
1.1.1. Geomorfometria e Formas de Terreno .....	14
1.1.2. Mapeamento das Formas de Terreno.....	15
1.1.3. Importância das Formas de Terreno nos Estudos de Paisagem.....	17
1.2 OBJETIVOS .....	19
1.2.1. Objetivo Geral .....	19
1.2.2. Objetivos Específicos .....	19
1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	20
<i>CAPÍTULO 2 - COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO POR ÂNGULO ESPECTRAL E DISTÂNCIA EUCLIDIANA NO MAPEAMENTO DAS FORMAS DE TERRENO</i> .....	21
2.1. INTRODUÇÃO .....	22
2.2. ÁREA DE ESTUDO .....	24
2.3. MATERIAL E MÉTODOS .....	28
2.3.1. Dados SRTM .....	28
2.3.2. Atributos de Terreno.....	29
2.3.3. Seleção das Assinaturas Geomorfométricas de Referência.....	31
2.3.4. <i>Spectral Angle Mapper</i> e Distância Euclidiana.....	32
2.3.5. Comparação entre os métodos .....	33
2.4. RESULTADOS .....	34
2.4.1. Assinaturas Geomorfométricas.....	34
2.4.2. Comparação entre as classificações por SAM e DE.....	37
2.4.3. Resultado do mapeamento das seis formas de terreno e comparação entre os classificadores SAM e DE.....	42
2.5. CONCLUSÕES .....	47
<i>CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS</i> .....	49
<i>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</i> .....	51

## ***CAPÍTULO 1 – APRESENTAÇÃO GERAL***

### **1.1 INTRODUÇÃO**

O Bioma Cerrado apresenta a maior biodiversidade e heterogeneidade de paisagens entre as savanas do mundo, em compensação vem sofrendo com a expansão agrícola e urbana (Silva e Bates, 2002). Essa importante diversidade biológica atrelada ao uso indiscriminado de recursos naturais levou o Cerrado à lista dos 25 *hotspots* prioritários para a conservação ambiental (Myers et al., 2000). Além disso, é o segundo maior bioma brasileiro com cerca de 2.000.000 km<sup>2</sup>, abrangendo 24% do território nacional. Essa abrangência reforça a importância de estudos sistemáticos sobre os diversos aspectos desse domínio, a fim de subsidiar políticas públicas e planejamentos futuros que visem à manutenção dos serviços ecossistêmicos prestados.

Para facilitar a gestão territorial o Cerrado foi dividido em 22 ecorregiões com paisagens mais homogêneas. Cada ecorregião possui características individuais no processo de evolução e ocupação da paisagem. A paisagem é composta por elementos que são organizados hierarquicamente em função do espaço e tempo (Martins et al., 2004): clima, rocha, relevo, solo e organismos. A análise da paisagem facilita a compreensão integrada dos fenômenos naturais e das relações entre a estrutura e a dinâmica ambiental. Essa abordagem conduz a estudos quantitativos que integram os elementos da paisagem em diversas escalas.

Entre as Ecorregiões do Cerrado mapeadas por Arruda et al. (2008) está o Planalto Central, que corresponde a 7,84% do bioma e encontra-se na região nuclear do mesmo. Essa ecorregião é diferenciada por uma ampla diversidade geomorfológica, caracterizada pelas superfícies de aplainamento Sul Americana e Velhas (King, 1956; Braun, 1971). A superfície Sul Americana está preservada na forma de chapadas, enquanto a Superfície Velhas, mais recente, é formada pela dissecação regressiva da primeira superfície. Entre os remanescentes das superfícies aplainadas ocorrem depressões interplanálticas dissecadas com relevo acidentado (Motta et al., 2002).

Deste modo, o relevo pode condicionar a distribuição espacial dos solos (Martins et al., 2007; Motta et al., 2002; Vasconcelos et al., 2012; Chagas et al., 2013) e dos organismos (Couto Junior et al 2010; Fonseca e Silva Júnior, 2004), incluindo a ocupação antrópica. Conseqüentemente, esse elemento mostra-se relevante para os estudos de organização da paisagem e planejamento dos recursos naturais.

Dentre as tecnologias aplicadas ao estudo do relevo destacam-se os dados topográficos provenientes Modelos Digitais de Elevação (MDE). O MDE é um plano de informações georreferenciadas da altimetria de um determinado local (Valeriano, 2008). Esta tecnologia diminui o custo e o tempo nos estudos do relevo, desde escalas menores em mapeamentos de Unidades Morfoestruturais, até escalas maiores, no mapeamento dos Modelados (IBGE, 2009). Esses dados permitem a obtenção automática, em um Sistema de Informações Geográficas (SIG), de atributos morfométricos como altitude, declividade, orientação de vertente, direção de fluxo, curvaturas do terreno, entre outros.

O MDE mais utilizado é o SRTM proveniente de uma missão 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 uma grade regular com resolução espacial de 3 arcsec (~90 metros) e precisão horizontal e vertical de 5 metros (Smith e Sandwell, 2003). A disponibilização desses dados trouxe um avanço importante nas pesquisas sobre a superfície terrestre (Van Zyl, 2001).

### **1.1.1. Geomorfometria e Formas de Terreno**

A avaliação quantitativa dos atributos morfométricos é o campo da Geomorfometria (Evans, 1972; MacMillan e Shary, 2009; Pike et al., 2009). Essa disciplina perpassa pelos campos das ciências de computação, matemática, engenharia civil e ciências da Terra (Pike, 2000). Basicamente, os principais dados na geomorfometria são parâmetros e objetos extraídos de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) utilizados para diferentes propósitos, tais como: classificação das formas do terreno (Saha et al., 2011; Ehsani e Quiel 2008, 2009; Ehsani et al. 2010; Dragut e Eisank, 2011; Vasconcelos et al., 2012), delimitação e classificação de bacias de drenagem (Menke et al. 2013; Oliveira et al., 2007 Sodré et al., 2007), movimento de massa (Guimarães et al., 2009; Gomes et al., 2008), mapeamento de solos (Leão et al., 2010; 2011; Barbieri et al., 2008; Camargo et al., 2010; Chagas et al. 2013), detec o de fitofisionomias (Fonseca e Silva Júnior , 2004; Bispo et al., 2010; Carvalho Júnior et al., 2008; Couto Júnior et al., 2010), dentre outros.

As formas de terreno são bases para os mapeamentos citados, sendo utilizadas na descri o dos processos como erosão e denuda o ( reas convexas), acumula o e deposi o ( reas côncavas) ou processos geomórficos como deposi o aluvial ou eólica (MacMillan e Shary, 2009). Essas formas de terreno são importantes no estudo da dinâmica do fluxo

superficial (Minár e Evans, 2008). Portanto, influenciam na dinâmica dos ecossistemas e na distribuição espacial da vegetação natural ou plantada.

### 1.1.2. Mapeamento das Formas de Terreno

A maioria dos trabalhos de mapeamento das formas de terreno utiliza a primeira e segunda derivadas do MDE. A primeira derivada consiste na declividade e direção das vertentes e a segunda são as curvaturas. A curvatura de uma superfície topográfica é principalmente expressa em termos de curvaturas de plano e de perfil (Klingseisen et al., 2008). Basicamente, a curvatura de perfil é a curvatura que segue a declividade, indicando a concavidade e convexidade da vertente, enquanto que a curvatura de plano é perpendicular à declividade, indicando convergência e divergência (Blaszczynski, 1997).

Wood (1996) propõe um método de classificação supervisionada que extrai e classifica seis Formas de Terreno: *Plane*, *Channel*, *Ridge*, *Pass*, *Peak* e *Pit*. O método considera uma combinação específica dos pares de curvaturas de perfil Longitudinal/Transversal e Mínima/Máxima a depender da declividade da região a ser classificada. Assim, as curvaturas Longitudinal/Transversal são apenas utilizadas quando o relevo apresenta uma declividade mais acentuada, enquanto as curvaturas de Mínima e Máxima são utilizadas em áreas de relevo mais suave.

Evans (2012) apresenta a necessidade de passar da delimitação manual para a classificação automatizada das formas elementares do terreno. Para ele, os parâmetros morfométricos como altimetria, declividade e curvaturas são essenciais, porém não exclusivos para a análise das formas. Em alguns ambientes devem ser acrescentados variáveis como a rede de drenagem e o contexto hidrológico.

Dragut e Eisank (2011) realizam uma análise sobre as escalas utilizadas no mapeamento das formas do relevo com base em MDEs. Eles consideram que uma mesma paisagem pode ser representada de diversas maneiras. Desta forma, a escala influencia diretamente no resultado do mapeamento.

Saha et al. (2011) consideram o mapeamento automático e manual de *drumlins* (unidades de relevo residual alongadas formadas pelo movimento lateral da camada espessa de gelo na última glaciação) como mapeamento de *landforms*. Os *drumlins* têm uma forma específica de relevo convexo alongado, portanto os métodos de mapeamento se enquadram nessa análise pela possibilidade de replicação nas áreas de Cristas no Planalto Central brasileiro, por exemplo. Os dados utilizados foram baseados em um MDE com resolução espacial de 30 m. O mapa de referência foi elaborado por composição colorida de parâmetros

morfométricos com a altimetria no canal do vermelho, declividade no canal do verde e aspecto no azul. Com base na imagem de referência os *drumlins* foram mapeados por interpretação visual e vetorização e posteriormente passando por um processo de classificação dos topos, seguido pela identificação automática das laterais dos topos. Esses dados foram unidos e os pixels não classificados foram preenchidos. Por fim foram realizadas estatísticas descritivas e teste de acurácia, mostrando que o procedimento automático de delimitação de *drumlins* é eficiente (Saha et al., 2011).

Ehsani e Quiel (2008) utilizam dados derivados do SRTM (declividade e curvaturas). Eles consideram a separação das curvaturas de Evans (1972) e utilizam as curvaturas mínima e máxima. Os autores também utilizam as considerações de Wood (1996). Ao aplicar o método no dado filtrado com janela 5 x 5 aparecem apenas as feições lineares, desconsiderando as feições pontuais como picos e depressões. Esse problema foi superado aplicando dois parâmetros, também elaborados por Wood (1996): a tolerância de inclinação e tolerância de curvatura que separa superfícies planas de encostas e canais, respectivamente.

Ehsani e Quiel (2009) utilizam a mesma metodologia do artigo anterior com SRTM, acrescentando dados do sensor ETM+ do Landsat visando classificar os elementos da paisagem. A principal diferença está na estrutura neural do SOM, onde não só os parâmetros morfométricos (declividade e curvaturas) são utilizados como input, como também as sete bandas do sensor ETM+ Landsat. O SOM é um algoritmo de rede neural artificial não supervisionada para agrupar ou visualizar um grande número de vetores de entrada, fornecendo uma saída em duas dimensões, com base nas regularidades e correlações entre eles. É utilizada uma pós-classificação para separar os corpos d'água. Após a classificação, o output é um mapa com informações morfométricas e de cobertura.

Ehsani et al. (2010) também utilizam o SRTM como dado de entrada. Os dados principais são re-projetados para UTM. São utilizados o SRTM C e o SRTM X adquirido a agência Espacial Alemã. Esse último é fornecido com resolução espacial de 30 m. O SRTM C é o dado bruto com resolução de 90m. Foi realizada uma interpolação para 30m para ser comparado com o original e com o MDE X. São gerados os parâmetros morfométricos (declividade e as curvaturas transversal, mínima e máxima) baseado em cada um dos MDE de entrada. Esses dados são normalizados e utilizados no classificador SOM. Com isso, são gerados mapas das formas semelhantes aos resultados de Ehsani e Quiel (2008). Porém, cada mapa saiu com uma resolução diferente. Os resultados foram comparados por tabulação cruzada. Os autores observam que o melhor resultado teve como input o MDE com melhor

resolução espacial, mostrando que em trabalhos de mapeamento das formas do terreno utilizando o SOM e SRTM original, deve ser realizada uma interpolação para 30m.

Com o objetivo de descrever as formas do terreno e os elementos das formas do terreno do Chapadão Zagaia, Serra da Canastra, Vasconcelos et al. (2012) também utilizam parâmetros geomorfométricos. Os parâmetros morfométricos utilizados pelo autor foram derivados de dados da SRTM. Os autores formulam a metodologia em duas etapas sequenciais. A primeira consiste na classificação por árvore de decisão de dados de altimetria e declividade. Foi elaborada uma composição colorida com a altimetria no canal do vermelho, declividade no canal do verde e mínima curvatura no azul. A partir dessa composição colorida, Vasconcelos et al. (2012) realizam a compartimentação geomorfológica identificando três ambientes geomorfológicos: áreas planas, ambientes dissecados e ambientes íngremes. A partir do resultado da compartimentação são estabelecidos critérios para a classificação por árvore de decisão. A classificação por árvore de decisão serve para embasar a etapa seguinte, onde são utilizados atributos de curvaturas no classificador espectral *Spectral Angle Mapper* (SAM). Foram utilizadas as seguintes curvaturas: vertical (banda 1), longitudinal (banda 2), transversal (banda 3), mínima (banda 4), máxima (banda 5) e horizontal (banda 6). As curvaturas são combinadas e normalizadas de modo que se agrupassem em bandas de um único dado. Assim, é possível identificar assinaturas geomorfométricas no n-dimensional das formas do terreno para serem inseridas no classificador SAM que quantifica o nível de semelhança espectral.

### **1.1.3. Importância das Formas de Terreno nos Estudos de Paisagem**

O avanço antrópico sobre a Terra deve ser feito causando o menor impacto possível sobre os fluxos naturais de energia e matéria nos ecossistemas. Deste modo, as atividades antrópicas devem tentar imitar o comportamento natural do ambiente. Portanto, os estudos das relações entre os componentes da paisagem são necessários para o planejamento territorial, agrícola e ambiental. As formas do terreno são elementos limitantes dos fluxos naturais.

Sinai et al. (1981) já demonstram a influência das formas do terreno na produtividade agrícola. Os autores estudam a relação da produtividade e do tamanho dos grãos de trigo com a convexidade e concavidade do terreno em Israel. Os resultados mostram uma produtividade agrícola quatro vezes maior nas áreas côncavas em relação às áreas convexas. Além disso, o tamanho dos grãos foi 32% maior nessas áreas de deposição.

De Gryze et al. (2008) utilizam dados de curvaturas e declividade para determinar zonas erosivas e deposicionais e relacionar com a distribuição espacial de uma lavoura de

milho na Bélgica. Além disso, diferenciam as amostras por tipo de cultura (convencional e de impacto mínimo). Os primeiros resultados mostram que em geral a quantidade de nutrientes é maior nas áreas deposicionais e menor nas áreas erosivas. A influência das formas do terreno é acentuada no plantio convencional. Os autores concluem afirmando que as interações entre formas do terreno e gestão agrícola precisam ser consideradas em avaliação de estoques regionais de matéria orgânica do solo. Kumhálová et al., (2011) mostram uma correlação significativa entre a concentração de nutrientes e a produção com índices topográficos na República Tcheca. Ao coletarem amostras de solo e organismos no período de quatro anos, eles mostram que essa relação fica maior no período de seca. Em alguns ambientes temperados as taxas de decomposição da matéria orgânica são duas vezes maiores nas áreas de deposição em relação às áreas de erosão (Berhe, 2012).

No Brasil, os principais estudos sobre a relação das formas do relevo com a vegetação são realizados de forma indireta, tendo o foco principal na variabilidade espacial dos atributos do solo, principalmente em escala de agricultura de precisão (Souza et al., 2004a, 2004b; 2006; Brito et al., 2006; Camargo et al., 2008, 2010; Sanchez et al., 2012).

Sanchez et al. (2012) avaliam como o mapeamento das formas do relevo podem auxiliar no manejo da fertilidade do solo em cultivo de cana-de-açúcar. Com base em análises geoestatísticas, os autores mostram que as formas do relevo são indicadores importantes para a aplicação de insumos, permitindo a redução dos custos de produção e dos danos ambientais.

Leão et al. (2010) mostram a relação das formas de relevo com a variabilidade espacial dos teores de nutrientes em folha de citros. A maior concentração de nutrientes nas folhas foi encontrada nos indivíduos presentes na porção côncava da área de estudo. Em outro estudo, na mesma área, as formas do relevo são relacionadas com os elementos químicos do solo. Mais uma vez a maior variabilidade aparece nas porções côncavas do terreno (Leão et al., 2011). Em alguns estudos, essa relação de maior variabilidade nas áreas côncavas e menor nas porções convexas, é invertida (Barbieri et al., 2008).

Além dos atributos químicos, a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo também sofre influência das formas do terreno. Camargo et al. (2010) relacionam atributos físicos como agregados, porosidade, densidade, resistência à penetração e umidade do solo em uma área côncava e em uma área convexa sobre Argissolo cultivado com cana-de-açúcar. Os resultados mostram que o solo da área convexa apresenta uma maior porosidade e menor densidade, além de terem os maiores valores de diâmetro de partículas. Por outro lado, o solo da porção côncava tem uma maior variabilidade espacial dos atributos.

Chagas et al. (2013) ressalta a influência dos atributos do terreno na distribuição dos solos na paisagem. Os autores consideram a curvatura do terreno como o principal fator controlador da profundidade do solo em relação à concavidade e convexidade das encostas, onde os solos mais profundos aparecem nas áreas côncavas e os mais rasos nas porções convexas do terreno. Além da menor profundidade, as porções convexas do relevo apresentam os maiores índices de erosão e perda de solo. Assim, em muitos casos, a intensidade da variabilidade dos atributos do solo, e conseqüentemente da produtividade da paisagem sofre mais influência das formas do relevo do que do próprio processo de erosão (Sanchez et al., 2009).

Em áreas com vegetação natural, as formas do relevo e parâmetros morfométricos são fatores limitantes para a distribuição espacial das espécies e fitofisionomias do Cerrado (Bispo et al., 2010; Couto Júnior et al., 2010). Fonseca e Silva Júnior (2004) avaliam a fitossociologia e a similaridade florística em uma mesma fitofisionomia (Cerrado sentido restrito) em diferentes formas do relevo denominadas pelos autores como interflúvio (porções convexas) e vales (porções côncavas) no Jardim Botânico de Brasília. Os resultados mostram diferenças florísticas nas duas posições topográficas estudadas. As espécies mais frequentes nos interflúvios são mais adaptadas à uma maior distância do lençol freático. Nota-se uma maior estabilidade temporal no armazenamento de água no solo em profundidade menor nas áreas côncavas de deposição durante o período seco (Salvador et al., 2012)

Observa-se que a maioria dos trabalhos sobre a relação entre formas do relevo e produtividade ou variabilidade espacial dos solos é relacionada à agricultura de precisão. O estudo regional em escalas menores pode modificar a classificação das formas do relevo mostrando uma visão sistêmica sobre a paisagem completa.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Comparar os métodos de classificação de assinaturas geomorfométricas utilizando métricas de similaridade e de distância no mapeamento das formas de terreno, aplicados na área do Campo de Instrução Militar de Formosa (CIF) localizado na bacia do Rio Preto.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- ✓ Selecionar assinaturas geomorfométricas representativas para a área de estudos.
- ✓ Mapear as formas de terreno utilizando classificação supervisionada de Distância Euclidiana (DE)

- ✓ Mapear as formas de terreno por meio da classificação supervisionada de similaridade SAM.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

Esta dissertação de mestrado foi elaborada em formato de artigo. Este formato de apresentação visa proporcionar a difusão do conhecimento científico, fortalecendo as diretrizes estabelecidas para os programas de pós-graduação no Brasil.

Neste capítulo foi feita uma contextualização do tema e uma apresentação geral dos principais conceitos abordados no trabalho. Além disso, foram apresentados os objetivos gerais e específicos da dissertação assim como sua forma de organização.

O capítulo 2 é composto pelo artigo intitulado “Comparação dos métodos de classificação por ângulo espectral e distância euclidiana no mapeamento das formas de terreno”, mesmo título da dissertação. Este artigo será submetido para publicação na Revista Brasileira de Geomorfologia. Nele foram testados dois métodos de classificação supervisionada para o mapeamento das formas de terreno do Campo de Instrução Militar de Formosa. Foram utilizadas assinaturas geomorfométricas de referência na classificação por distância (DE), e por similaridade (SAM).

O capítulo 3 apresenta as conclusões e considerações finais da dissertação, novas questões de pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.

## **CAPÍTULO 2 - COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE CLASSIFICAÇÃO POR ÂNGULO ESPECTRAL E DISTÂNCIA EUCLIDIANA NO MAPEAMENTO DAS FORMAS DE TERRENO**

### **RESUMO**

A geomorfometria é o campo da ciência que estuda de forma quantitativa a superfície topográfica. Dentre os métodos de classificação das formas do terreno destaca-se a classificação supervisionada pelo emprego de assinaturas geomorfológicas de referência. A classificação por assinaturas geomorfológicas pode utilizar métricas de similaridade e distância. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é comparar os métodos de classificação utilizando métricas de similaridade e distância no mapeamento das formas de terreno. A metodologia possui as seguintes etapas: aquisição dos dados HydroSHEDS, geração das imagens de curvaturas, seleção das assinaturas geomorfológicas de referência; classificação pelo método SAM e Distância Euclidiana; comparação dos resultados usando tabulação cruzada. Para a definição das assinaturas geomorfológicas foi elaborada uma imagem unindo os conjuntos de curvaturas Longitudinal e Transversal, Mínima e Máxima. A detecção das assinaturas de referência adotou as seguintes etapas: (a) redução da quantidade de informações espectrais pelo algoritmo *Minimum Noise Fraction* (MNF) que separa a fração sinal do ruído; (b) redução da quantidade de informação espacial selecionando os *pixels* mais puros pelo Índice de Pureza do Pixel (PPI); e (c) seleção das assinaturas geomorfológicas em um visualizador n-dimensional. A classificação das assinaturas foi simplificada nas seis formas de terreno: Convexo/Convexo (Cx/Cx); Côncavo/Côncavo (Cc/Cc); Côncavo/Convexo (Cc/Cx); Côncavo/Retilíneo (Cc/Rt); Convexo/Retilíneo (Cx/Rt); Retilíneo/Retilíneo (Rt/Rt). A classificação foi realizada a partir de 14 assinaturas geomorfológicas. O método SAM evidenciou formas de terreno de transição e côncavas. Por outro lado, o resultado da classificação por distância euclidiana contemplou principalmente os padrões retilíneos. Os resultados mostraram que a distância euclidiana foi mais adequada por mapear principalmente as assinaturas que se aproximam dos valores de curvaturas da área de estudo. Considerando apenas as seis formas de terreno, a comparação pela matriz de confusão mostrou um aumento na precisão entre os dois métodos, mas os resultados continuaram diferentes. O SAM apresentou um mapeamento com predomínio de formas Cc/Rt, Cx/Rt e Cc/Cx, indicando um terreno heterogêneo com muitas áreas de transição. A distância euclidiana mostrou um terreno com o predomínio das formas Rt/Rt. Portanto, a distância euclidiana foi a classificação mais adequada para o mapeamento das formas de terreno do CIF.

**Palavras-Chave:** geomorfometria, curvaturas de perfil, assinatura geomorfológica.

### **COMPARISON BETWEEN SPECTRAL ANGLE MAPPER AND EUCLIDEAN DISTANCE IN LANDFORM MAPPING**

#### **ABSTRACT**

The geomorphometry is a field of science that studies quantitatively the topographic surface. Among the landform classification methods highlight the supervised classification by use of reference geomorphometric signatures. Geomorphometric signatures classification can use similarity metrics and distance metrics. In this context, the objective of this study is to compare the classification methods using similarity metrics and distance in the landforms

mapping. The methodology has the following steps: acquisition of HydroSHEDS data, generation of curvature images, reference geomorphometric signatures selection; SAM and Euclidean distance classification method; results comparison using cross tabulation. For the definition of geomorphometric signatures was drawn a picture joining the sets of Longitudinal and Cross-sectional curvatures, Minimum and Maximum. The reference signatures detection adopted the following steps: (a) reducing the amount of spectral information by Minimum Noise Fraction algorithm (MNF) separating the fraction noise/ signal; (b) reducing the amount of spatial information by selecting the most pure pixels by the Pixel Purity Index (PPI); and (c) selection of geomorphometric signatures in a n-dimensional viewer. The signatures classification has been simplified in the six forms of land: Convex/Convex (Cx/Cx); Concave/Convex (Cc/Cx); Concave/Concave (Cc/Cc); Concave/Rectilinear (Cc/Rt); Convex/Rectilinear (Cx/Rt); Rectilinear/Rectilinear (Rt/Rt). Classification was carried out from 14 geomorphometric signatures. The SAM method showed the transition and concave landform. On the other hand, the result of the mainly included the rectilinear patterns. The Euclidean distance classification results showed that the Euclidean distance is more particularly suitable for mapping the signatures that are close to the values of study area curvature. Considering only the six landforms, compared to the confusion matrix showed an increase in accuracy between the two methods, but the results remain different. SAM presented a mapping with predominant forms Cc/Rt, Cx/Rt and Cc/Cx, indicating a heterogeneous terrain with many transition areas. The Euclidean distance showed a plot with the predominance of forms Rt/Rt. Therefore, the Euclidean distance was the most appropriate classification for mapping the landforms of this study area.

**Keywords:** geomorphometry, profile curvature, geomorphometric signature.

## 2.1. INTRODUÇÃO

A geomorfometria é o campo da ciência que estuda de forma quantitativa a superfície topográfica (Evans, 1972; MacMillan e Shary, 2009; Pike et al., 2009). É uma disciplina que perpassa por diferentes campos da ciência, tais como computação, matemática, engenharia civil e ciências da Terra (Pike, 2000). Basicamente, a geomorfometria extrai parâmetros e objetos de Modelos Digitais de Elevação (MDEs) com o propósito de classificar as formas do terreno, delimitar as bacias de drenagem, analisar o movimento de massa, mapear os solos, dentre outros.

MacMillan e Shary (2009) destacam a importância das formas de terreno na paisagem para compreender os processos geomorfológicos, geológicos, hidrológicos, ecológicos e de formação dos solos. Os limites superficiais das formas do terreno são utilizados na interpretação ou inferência de processos superficiais como erosão e denudação (áreas convexas) ou acumulação e deposição (áreas côncavas) (MacMillan e Shary, 2009).

Com a maior disponibilização de MDE nas últimas décadas e o desenvolvimento de técnicas de análise dos atributos morfométricos em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) houve um avanço significativo na geomorfometria para a classificação de formas de

terreno (Dragut e Blaschke, 2006; Iwahashi e Pike, 2007; Saha et al., 2011; Klingseisen, et al. 2008; Dragut e Eisank, 2011; Vasconcelos et al. 2012; Evans, 2012; Reu et al., 2013; Jasiewicz e Stepinski, 2013). Os principais métodos desenvolvidos utilizam uma chave de classificação dos atributos de terreno considerando um conjunto de regras pré-estabelecidas. O tipo de atributo morfométrico a ser utilizado, normalmente, irá depender do relevo modelado e da técnica de classificação utilizada. Os métodos de classificação podem ser divididos entre não-supervisionada e supervisionada.

A classificação não-supervisionada requer pouca participação do especialista. É utilizada principalmente quando não se sabe exatamente o número de classes que será mapeada, ou seja, consiste em uma análise exploratória da área em estudo. Grande parte dos trabalhos de classificação das formas de terreno utiliza métodos não-supervisionados como Fuzzy, Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique (ISODATA) e Self-Organizing Map (SOM) (Irvin et al. 1997; Schmidt e Hewitt, 2004; Arrel et al., 2007; Iwahashi e Pike, 2007; Ehsani e Quiel, 2008, 2009; Ehsani et al., 2010).

Arrel et al., (2007) utilizam a lógica Fuzzy para mapear as formas de terreno em várias escalas de resolução espacial, a partir da declividade, curvatura de plano e curvatura de perfil. Iwahashi e Pike (2007) utilizam métodos não-supervisionados com uma combinação de limites de variáveis para mapear as formas de terreno de todos os continentes, com base nos atributos de terreno (gradiente de declividade, textura da superfície e convexidade local) provenientes de um MDE de resolução espacial de 1km. Ehsani e Quiel (2008) classificam os atributos de terreno (curvaturas transversal, máxima, mínima e declividade) a partir do método SOM. Complementarmente, Ehsani e Quiel (2009) utilizaram o algoritmo SOM para integrar os atributos morfométricos com dados de vegetação (bandas do sensor ETM+ do Landsat) no mapeamento da paisagem.

A classificação supervisionada depende do conhecimento do analista para determinar o tipo e número de classes. Nesse caso, amostras representativas devem ser escolhidas na imagem para servir de referência na classificação (Meneses e Sano, 2012). Dentro desse contexto, é possível destacar métodos que utilizam medidas de distância e similaridade. É possível destacar duas medidas de similaridade para a classificação de imagens de sensoriamento remoto: *Spectral Correlation Mapper* (SCM) e o *Spectral Angle Mapper* (SAM). O SCM ainda não foi utilizado para classificação de formas de terreno, sendo sua aplicação direcionada ao sensoriamento remoto na classificação de imagens hiperespectrais e na detecção de mudanças (Carvalho Júnior e Meneses, 2000; Carvalho Júnior et al. 2009, 2011). Em contraposição, Vasconcelos et al., (2012) utilizado o SAM para separar diferentes

formas topográficas na paisagem a partir de assinaturas de atributos morfométricos (declividade e curvaturas longitudinais, transversais, máxima e mínima). Apesar dos resultados satisfatórios da classificação utilizando o SAM, a similaridade ainda não é o método mais adotado para classificação de formas de terreno. Métodos como fuzzy, SOM e ISODATA utilizam a distância como parâmetro de análise na classificação. Dentro desse contexto, o objetivo desse trabalho é comparar os métodos de classificação de assinaturas geomorfométricas utilizando métricas de similaridade e de distância no mapeamento das formas de terreno, aplicados na área do Campo de Instrução Militar de Formosa (CIF) localizado na bacia do Rio Preto.

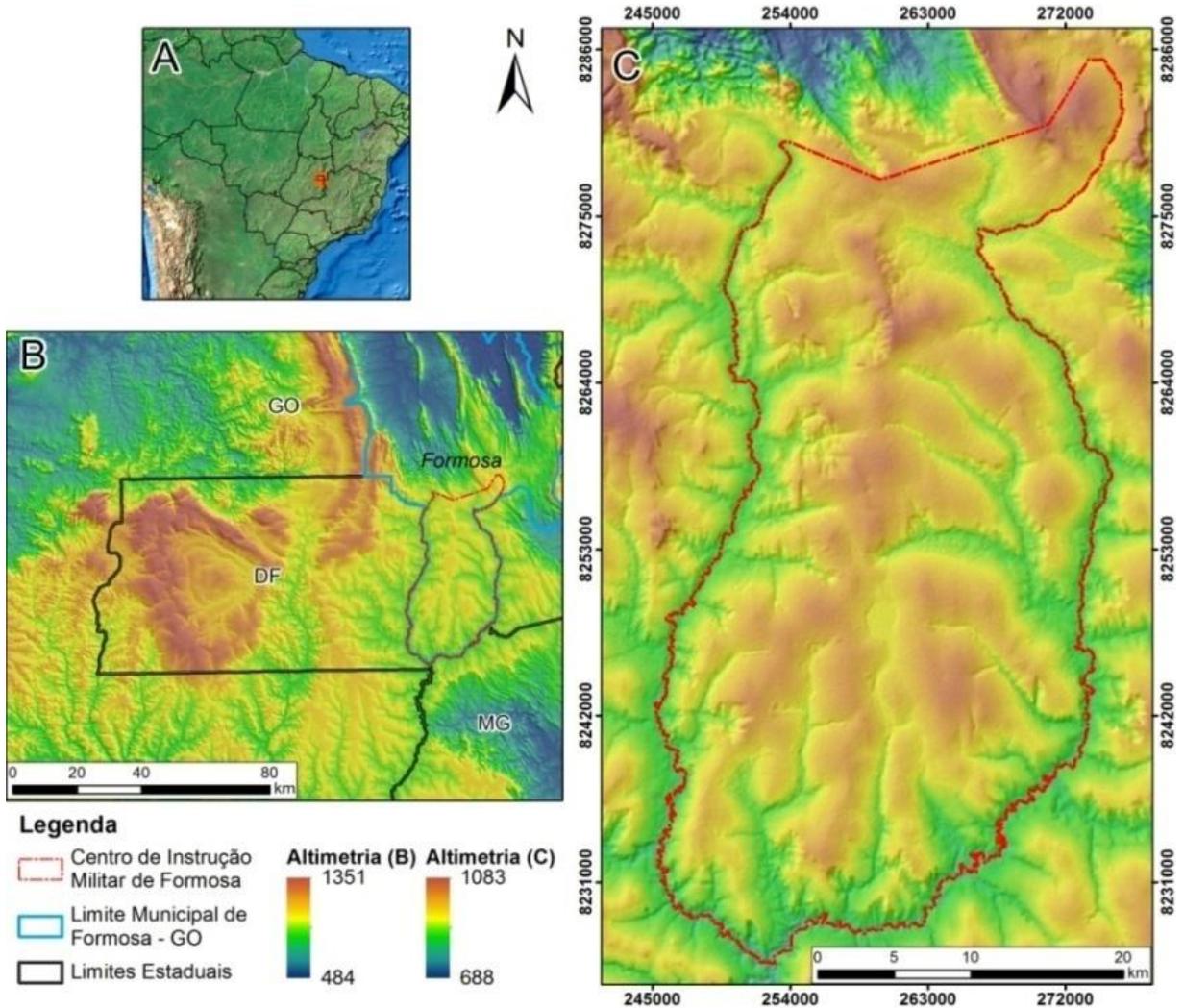
## **2.2.ÁREA DE ESTUDO**

O CIF está contido no município de Formosa-GO, fazendo divisa ao sul com o Estado de Minas Gerais e para oeste com Distrito Federal, entre as coordenadas UTM 8285326,28 e 8225529,01 metros Sul e 245255,38 e 275840,81 metros Leste (Fuso 23°S e Datum WGS-1984). Possui uma área de aproximadamente 115000 hectares. A área faz parte da Bacia hidrográfica do Rio Preto, afluente do Rio São Francisco. O CIF é limitado a leste pelo rio Bezerra e a oeste pelo próprio rio Preto (Figura 1).

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 distribuídos 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% (Silva et al., 2008).

A região apresenta falhas de empurrão, cavalgamentos e grandes variações na espessura dos conjuntos litológicos, característicos da Faixa Brasília, formada na Orogênese Brasileira que ocorreu no Neoproterozóico/Cambriano (Scislowski et al., 2003). Em toda a área do CIF 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).



**Figura 1** - Localização do CIF no contexto nacional (A), regional com altimetria (metros de altitude) da região do Distrito Federal e entorno (B) e altimetria local (C).

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 CIF 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, ou Planalto Retocado do Bambuí, formado por saprólitos desenvolvidos sobre rochas pelíticas. Essas rochas estão intercaladas com lentes de calcário que promovem ambientes cársticos locais, como dolinas, que desenvolvem ambientes lacustre em superfície. A formação desses ambientes pode estar associada à grande captura de drenagem que ocorreu na área. Em outros

tempos, o rio Preto corria para sul sobre o leito do rio São Marcos, que tem características geomorfológicas semelhantes. Portanto, fazia parte da bacia hidrográfica do rio Paraná. Atualmente, este planalto pertence à bacia do São Francisco. Após a captura, a bacia do rio Preto passou a apresentar uma taxa de erosão elevada por causa do grande desnível entre o nível de base de São Francisco e o planalto (Dantas, 2003).

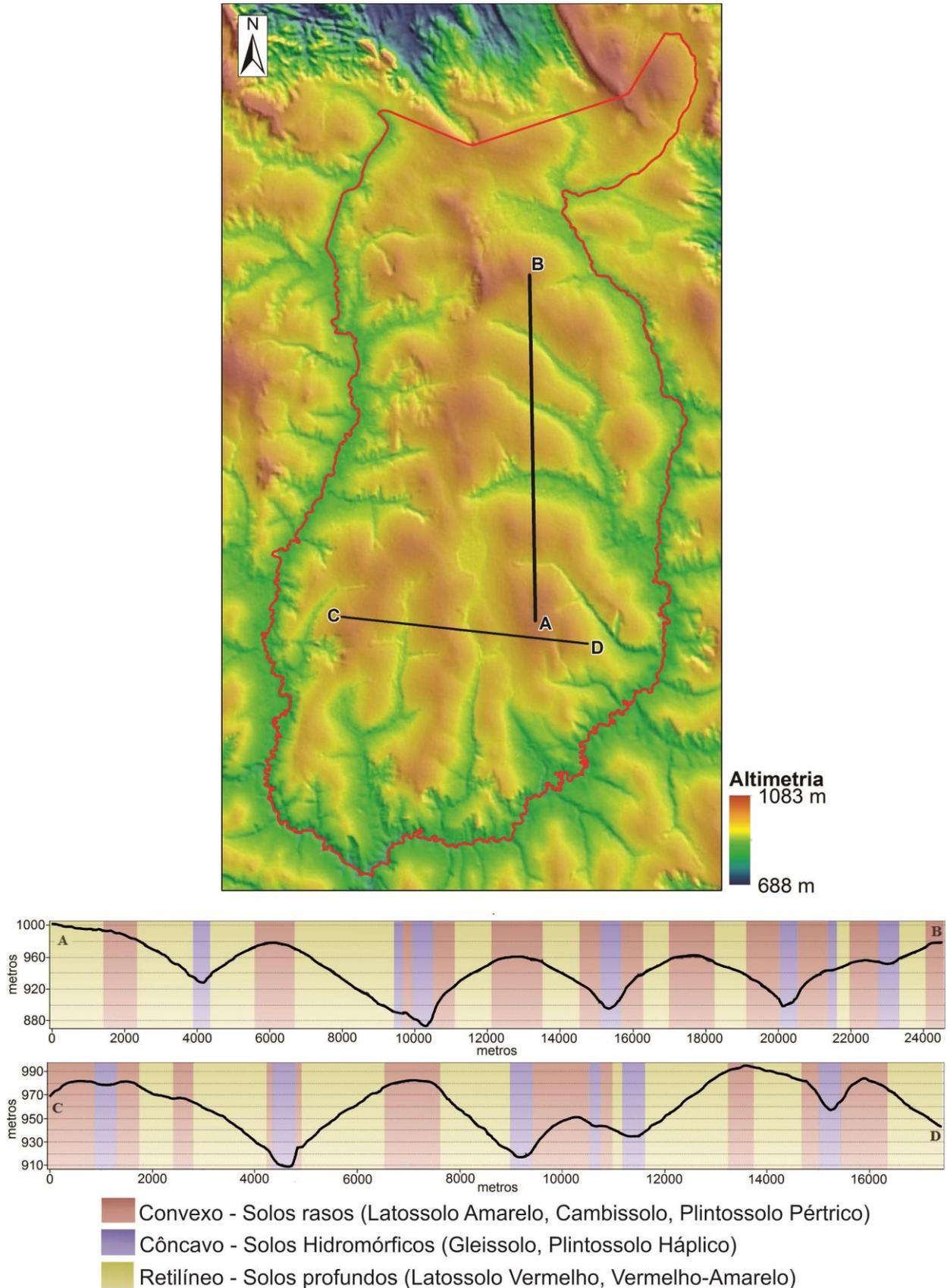
Com isso, os divisores de drenagem tomam formas convexas suaves com vertentes retilíneas, enquanto as drenagens são bem acomodadas formando vales côncavos encaixados por toda a área de estudos (Figura 2). Além disso, ocorrem algumas áreas em processo de captura de drenagem, onde as nascentes de dois cursos d'água estão próximas e formam um divisor de drenagem convexo e côncavo simultaneamente.

As características de relevo estável de plano a suave ondulado com o padrão convexo favorecem a presença dos Latossolos (Reatto et al. 2009). Essas paisagens são sustentadas principalmente pela presença de couraça laterítica nas bordas. As condições ambientais e climáticas favorecem o acúmulo de ferro (Fe) em forma de hematita ( $Fe_2O_3$ ) nos limites do relevo suave-ondulado (Penteado, 1976; Martins, 2000). O Fe se desloca do interior e se dirige para as bordas por acepção lateral, onde encontra a zona de déficit hídrico formando uma couraça laterítica.

Os solos da área de estudos seguem organização de catenas na forma de hidrossequências características do Cerrado, de acordo com a disponibilidade hídrica e profundidade do perfil (Macedo e Bryant, 1987). Nos topos e áreas mais planas existe o predomínio do Latossolo Vermelho. Nos rebordos predominam os Latossolos Vermelho-Amarelo e Amarelo, o último mais próximo das bordas, com maior proximidade do lençol freático (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 couraça laterítica (Lima et al. 2009). Isso ocorre quando o topo é resquício do processo erosivo que está agindo no local. 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).

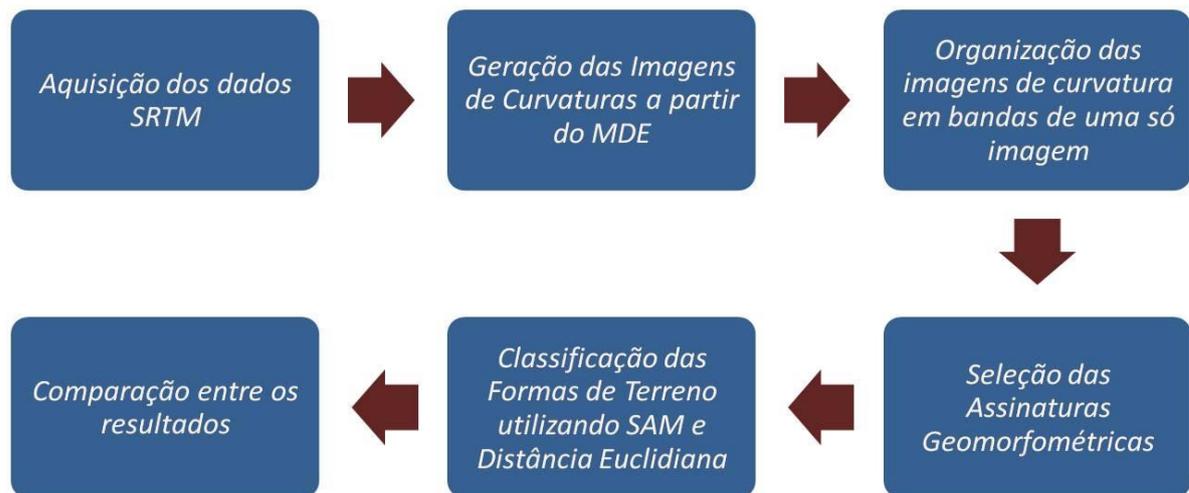
Os solos em geral são muito espessos e o perfil de intemperismo é profundo devido às condições climáticas. As principais classes de solos encontradas na área de estudos são os Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo, Cambissolos, e Solos Hidromórficos. Os solos Hidromórficos estão associados à influência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



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

## 2.3.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 das imagens de curvatura em bandas de uma só imagem; (d) seleção das assinaturas geomorfométricas; (e) classificação das formas utilizando o SAM e a Distância Euclidiana (DE); (f) comparação entre os métodos usando tabulação cruzada; e (g) reconhecimento das formas de terreno em campo (Figura 3).



**Figura 3** - Fluxograma metodológico com as etapas do trabalho.

### 2.3.1. Dados SRTM

A missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) adquiriu dados topográficos de 80% da superfície terrestre (entra 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 uma grade regular com resolução espacial de 3 arcsec (~90 metros) e precisão horizontal e vertical de 5 metros (Smith e Sandwell, 2003). A disponibilização desses dados trouxe 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; Rabus et al., 2003; Luedeling et al., 2007).

O produto HydroSHEDS (Hydrological data and maps based on SHuttle Elevation Derivatives at multiple Scales), desenvolvido pelo programa de ciência da conservação do Fundo Mundial da Vida Selvagem (WWF- Sigla em inglês) em conjunto com o Serviço

Geológico dos Estados Unidos (USGS) e outras instituições, efetua uma correção dos dados SRTM a partir da correção das drenagens e filtragens (Lehner et al., 2006). Desta forma, na presente pesquisa foi utilizado os dados do HydroSHEDS.

### 2.3.2. Atributos de Terreno

A curvatura de uma superfície topográfica é principalmente expressa em termos de curvaturas de plano e de perfil (Klingseisen et al., 2008). Basicamente, a curvatura de perfil é a curvatura que segue a declividade, indicando a concavidade e convexidade da vertente, enquanto que a curvatura de plano é perpendicular à declividade, indicando convergência e divergência (Blaszczynski, 1997). Na presente pesquisa, os atributos morfométricos utilizados para descrever as formas de terreno foram as curvaturas de perfil Longitudinal e Transversal (Wood, 1996), Mínima e Máxima (Young, 1978).

A curvatura longitudinal corresponde ao cruzamento com o plano de declividade normal na direção da vertente, ou seja, mostra o perfil lateral do topo até a base da vertente. A curvatura transversal ilustra um corte de perfil perpendicular à direção da vertente em área com declividade normal. As curvaturas mínima e máxima mostram o grau de concavidade e convexidade, respectivamente, em qualquer plano de superfície, independente da declividade (Wood, 1996). As imagens de curvaturas são geradas pelas equações:

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

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

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

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

onde  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$  são equações baseadas matriz de altimetria ( $Z$ ) (Figura 4), considerado a distância entre os centros das células ( $L$ ) (Zevenbergen e Thorne, 1987):

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

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

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

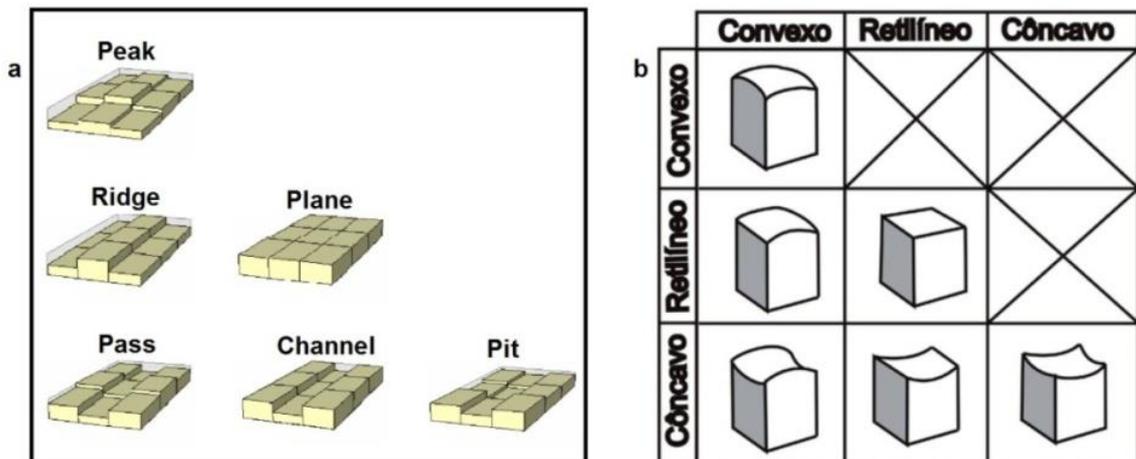
$$d = \frac{(-Z_4 + Z_6)}{2L} \quad (8)$$

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

$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$
$Z_4$	$Z_5$	$Z_6$
$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$

**Figura 4** - Representação de uma matriz 3x3 de um Modelo Digital de Elevação com a numeração utilizada por Zevenbergen e Thorne (1987) nas equações que servem de base para os cálculos de curvatura.

Este conjunto de elementos permite identificar seis feições (Figura 5 a) baseadas nas combinações de três componentes para a delimitação das formas de terreno (Figura 5 b). Os tipos de formas de terreno adotados nesta pesquisa são os descritos por Wood (1996): *peak*, *ridge*, *plane*, *pass*, *channel* e *pit*.



**Figura 5** - Feições morfométricas (a) e as respectivas Formas de Terreno (b). Adaptado de Wood (1996).

Na extração das curvaturas foi utilizada uma janela de dimensão 11x11 para eliminar valores discrepantes e pixels isolados (Vasconcelos et al., 2012). Os pixels com esses valores foram identificados e retirados. As curvaturas foram organizadas em quatro bandas: Banda 1 - Curvatura Longitudinal; Banda 2 - Curvatura Transversal; Banda 3 - Mínima Curvatura; Banda 4 - Máxima Curvatura. Deste modo, cada pixel possui uma assinatura geomorfométrica

que representa uma forma de terreno, de forma semelhante as imagens multibandas de sensores orbitais (Vasconcelos et al., 2012).

Basicamente, a feição Côncavo/Retilíneo (Cc/Rt, *channel*) tem valores de curvatura transversal negativos, as feições Convexo/Retilíneo (Cx/Rt, *ridge*) tem valores positivos e a forma Retilíneo/Retilíneo (Rt/Rt), valores próximos a zero. A curvatura longitudinal é utilizada para auxiliar a classificação das outras três classes: Convexo/Convexo (Cx/Cx, *peaks*) tem valores positivos tanto na curvatura longitudinal quanto na transversal; Côncavo/Côncavo (Cx/Cx, *pit*) tem valores negativos em ambas as curvaturas; Convexo/Côncavo (Cx/Cc, *pass*) trazem sinais opostos entre as curvaturas. As curvaturas mínima e máxima são usadas para auxiliar a classificação nos locais onde a declividade é nula (Wood, 1996). Para uma melhor visualização do dado, as imagens de curvatura foram multiplicadas por 10, portanto, não sendo necessária a normalização adotada por Vasconcelos et al. (2012).

### 2.3.3. Seleção das Assinaturas Geomorfométricas de Referência

Após a definição das curvaturas, foram adotadas técnicas para a seleção de assinaturas geomorfométricas de referências, geralmente utilizadas em dados de sensoriamento remoto com a denominação de seleção de membros finais (Vasconcelos et al., 2012). Este procedimento considera três etapas (Boardman e Kruse, 1994): (a) redução da quantidade de atributos pelo algoritmo *Minimun Noise Fraction* (MNF); (b) redução da quantidade de informação espacial selecionando os pixels mais puros pelo Índice de Pureza do Pixel (PPI - sigla em inglês); (c) seleção das assinaturas pelo visualizador n-dimensional.

O MNF é um método derivado da Análise de Principais Componentes. Este método separa a componente de ruído da imagem. Além disso, 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 assinaturas geomorfométricas dos pixels puros.

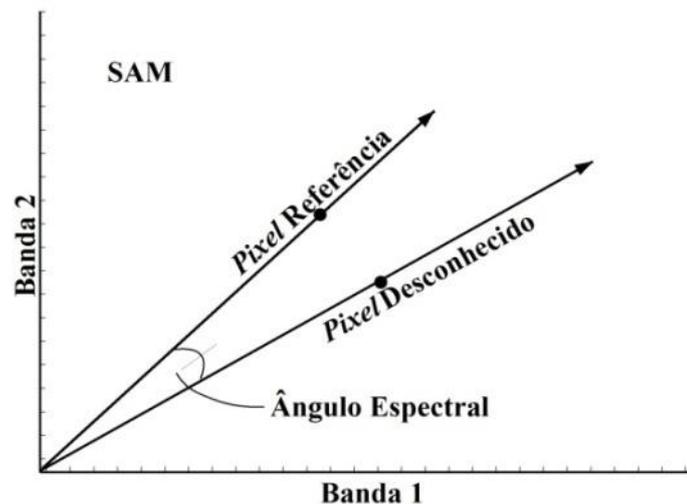
A partir desta etapa, a seleção das assinaturas geomorfométricas se torna subjetiva, semelhante ao processo de seleção de diferentes alvos espectrais no sensoriamento remoto. A quantidade de assinaturas e a seleção da nuvem de pixels no gráfico n-Dimensional dependem diretamente do analista.

### 2.3.4. Spectral Angle Mapper e Distância Euclidiana

As assinaturas geomorfométricas de referência foram comparadas com as curvas geomorfométricas de cada pixel 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 assinatura da imagem em um espaço n-Dimensional, considerando os pixels como vetores (Figura 6). Os valores de SAM são dados em radianos, onde o menor valor de  $\alpha$  tem a maior semelhança entre as assinaturas (Kruse et al., 1993).

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

onde  $nb$  é o número de bandas da imagem,  $EI$  é o espectro a ser classificado (neste caso, assinatura geomorfométrica) e  $ER$  é o espectro referência (assinatura selecionada no visualizador n-dimensional).



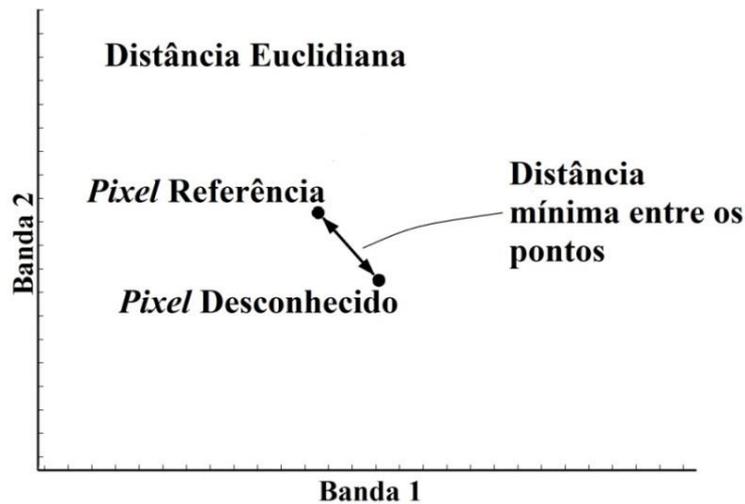
**Figura 6** - Representação do algoritmo SAM em um espaço bidimensional.

Cada assinatura corresponde a uma classe de acordo com o grau de similaridade ou ângulo espectral. Ou seja, quanto menor o ângulo entre a assinatura estabelecida e a assinatura do pixel que será classificado, maior a similaridade entre eles. Neste caso, o pixel será classificado pela assinatura geomorfométrica que apresentou o menor ângulo espectral.

A DE é a medida de distância mais utilizada entre os classificadores de distância. A distância euclidiana entre os dois pontos  $EI$  e  $ER$  no espaço n-dimensional é descrito por:

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

Neste método quanto maior for a distância euclidiana menor é a possibilidade do espectro da imagem estar no mesmo grupo que o de referência (Figura 7). Para efetuar a classificação o pixel adquire o rótulo da curva com menor distância euclidiana entre as curvas analisadas.



**Figura 7** - Representação da DE em um espaço bidimensional.

### 2.3.5. Comparação entre os métodos

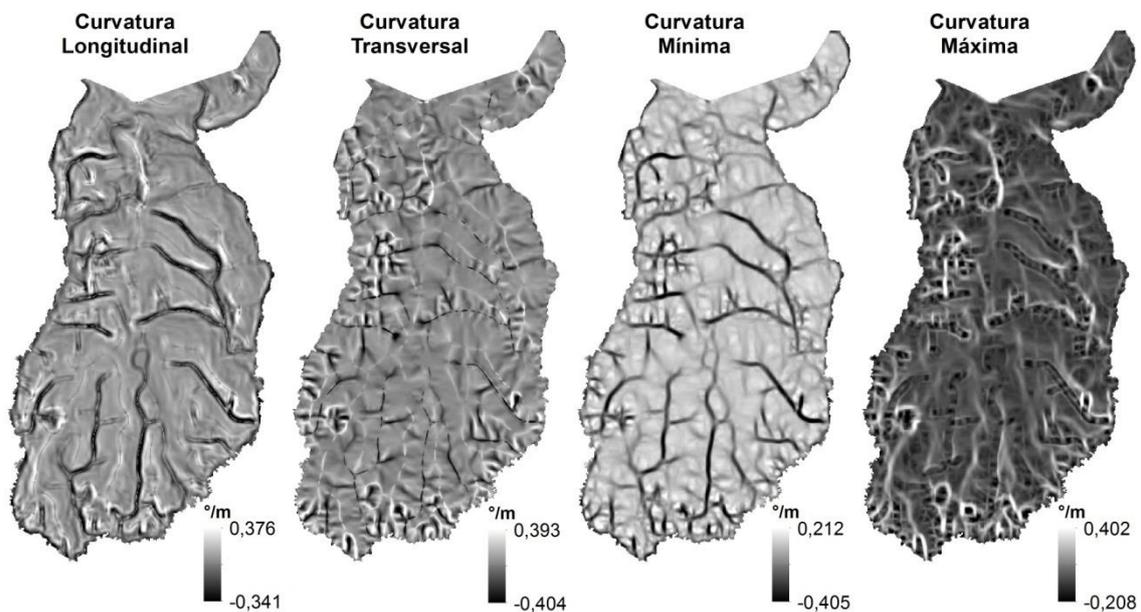
Para fins de comparação, foi realizada uma tabulação cruzada entre os dois resultados obtidos pelo classificador SAM e DE, assinalando as principais diferenças ou semelhanças entre os métodos. Além disso, foi realizada uma simplificação para as seis classes de formas de terreno mencionadas: Convexo/Convexo (Cx/Cx); Côncavo/Côncavo (Cc/Cc); Convexo/Côncavo (Cx/Cc); Côncavo/Retilíneo (Cc/Rt); Convexo/Retilíneo (Cx/Rt); Retilíneo/Retilíneo (Rt/Rt). Os resultados da simplificação dos mapas de formas de terreno também foram comparados entre si.

Ao final foi realizado uma visita a campo da área de estudo para avaliar as formas de terreno obtidas pelos métodos.

## 2.4. RESULTADOS

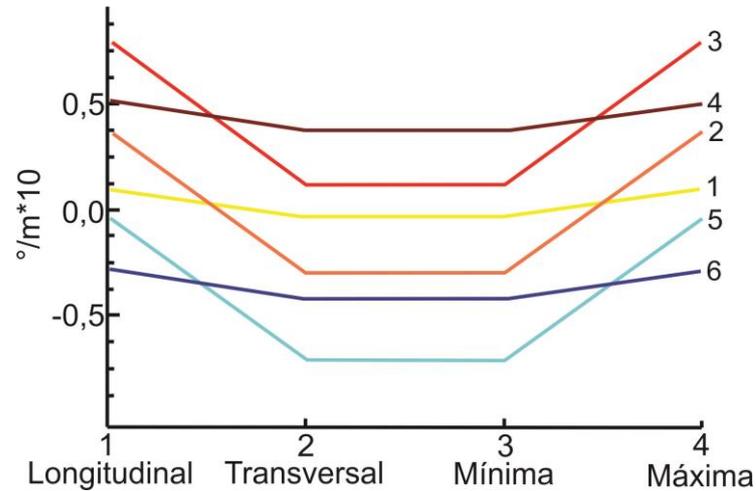
### 2.4.1. Assinaturas Geomorfométricas

Não existem especificações rígidas para assinaturas geomorfométricas corretas. Minimamente, uma assinatura precisa distinguir uma superfície topográfica de outras (Pike, 1988). Nesse trabalho, cada uma das assinaturas é formada pelo conjunto de valores de curvaturas (longitudinal, transversal, mínima e máxima). Os valores das curvaturas na área de estudo estão concentrados próximos de zero (entre  $0,400^{\circ}/m$  e  $-0,400^{\circ}/m$ ) (Figura 8).

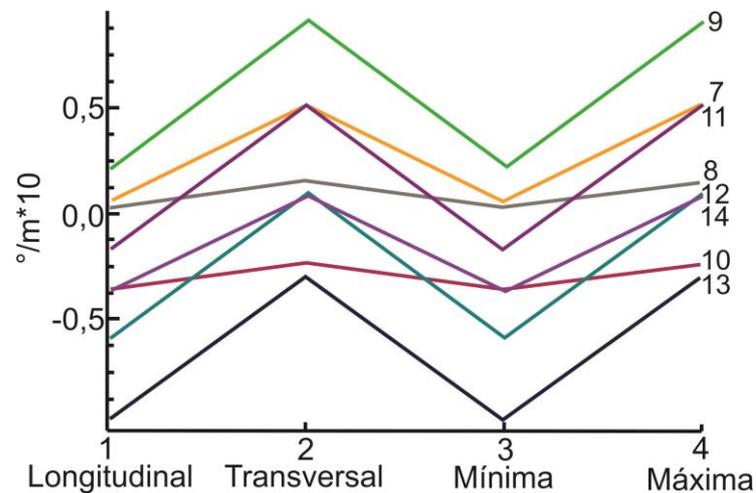


**Figura 8** - Curvaturas de perfil apresentadas em valores reais utilizadas no mapeamento das formas de terreno do CIF. É possível observar que estão na mesma ordem de grandeza de valores (entre  $0,4$  e  $-0,4^{\circ}/m$  aproximadamente).

Foram selecionadas 14 assinaturas geomorfométricas representativas das seis formas de terreno. As assinaturas podem ser apresentadas em formato de “U”, quando a curvatura longitudinal tem um valor maior que a curvatura transversal (Figura 9), e o formato de “N”, quando a curvatura transversal é maior (Figura 10). O formato da assinatura de referência pode influenciar na classificação de acordo com o método utilizado. Os valores das curvaturas que caracterizam cada assinatura geomorfométrica selecionada estão representados na Tabela 1.



**Figura 9** - Assinaturas Geomorfológicas de referência em formato de “U” selecionadas para o mapeamento das formas de terreno.



**Figura 10** - Assinaturas Geomorfológicas de referência em formato de “N” selecionadas para o mapeamento das formas de terreno.

**Tabela 1** – Valores de das curvaturas em cada assinatura geomorfológica. Os valores estão em  $\%/m$  e foram multiplicados por 10 para facilitar a interpretação.

Assinatura Geom.	Curvaturas				Formas de Terreno
	Longitudinal	Transversal	Mínima	Máxima	
1	0,109	-0,020	-0,021	0,110	Rt/Rt
2	0,372	-0,297	-0,297	0,373	Cx/Cc
3	0,772	0,102	0,102	0,773	Cx/Rt
4	0,509	0,379	0,378	0,510	Cx/Cx
5	-0,027	-0,697	-0,967	-0,026	Cc/Rt
6	-0,290	-0,420	-0,421	-0,289	Cc/Cc
7	0,049	0,495	0,041	0,503	Cx/Rt
8	0,042	0,166	0,042	0,166	Rt/Rt
9	0,223	0,907	0,222	0,908	Cx/Cx
10	-0,357	-0,233	-0,357	-0,233	Cc/Cc
11	-0,176	0,507	-0,177	-0,508	Cx/Cc
12	-0,576	0,107	-0,577	0,108	Cc/Rt
13	-0,976	-0,292	-0,977	-0,292	Cc/Cc
14	-0,350	0,095	-0,358	0,103	Cc/Rt

As assinaturas 4 e 9 mostram padrões de convexidade. Ambas representam a forma Cx/Cx. Porém, a primeira mostra um padrão de forma mais homogêneo apresentando uma convexidade bem distribuída enquanto que a assinatura 9 apresenta uma convexidade acentuada evidenciada pelo valor de curvatura transversal, associada a uma forma mais suave na assinatura longitudinal.

A forma de terreno Cx/Rt está representada nas assinaturas 3 e 7. A assinatura 3 apresenta um valor elevado de curvatura longitudinal ( $0,772^\circ/\text{m}$ ) característico da forma convexa, porém a curvatura transversal se aproxima de zero, indicando um relevo retilíneo. O mesmo ocorre com a assinatura 7, porém, com inversão das curvaturas. A curvatura longitudinal ( $0,049^\circ/\text{m}$ ) indica uma forma de terreno retilínea, enquanto a transversal ( $0,495^\circ/\text{m}$ ) apresenta uma forma convexa.

As assinaturas 2 e 11 apresentam padrões de formas de terreno transacionais com valores de curvaturas que representam tanto as formas convexas quanto formas côncavas. Essas características indicam que as assinaturas correspondem à forma de terreno Cx/Cc. Na assinatura 2 a feição convexa está na curvatura longitudinal ( $0,372^\circ/\text{m}$ ) e a feição côncava na curvatura transversal ( $-0,297^\circ/\text{m}$ ). O valor de curvatura longitudinal da assinatura 11 representa uma forma suavemente côncava ( $0,176^\circ/\text{m}$ ) associada a uma convexidade mais acentuada na curvatura transversal ( $0,507^\circ/\text{m}$ ).

A forma de terreno Rt/Rt é caracterizada por ter valores próximos a zero em todas as curvaturas que formam a assinatura geomorfométrica. As assinaturas 1 e 8 representam esta forma de terreno. O valor de curvatura longitudinal da assinatura 1 é de  $0,109^\circ/\text{m}$ , mostrando um padrão retilíneo com uma leve tendência à convexidade. Por outro lado, na curvatura transversal o valor é negativo ( $-0,020^\circ/\text{m}$ ), o que indica uma concavidade muito pequena que, por estar próximo de zero, é considerada retilínea.

As assinaturas 6, 10 e 13 têm valores negativos em todas as curvaturas. Além disso, os valores não estão próximos de zero (abaixo de  $-0,200^\circ/\text{m}$ ), caracterizando a forma de terreno Cc/Cc. As assinaturas 6 e 10 se comportam de forma semelhante no terreno, com as curvaturas variando entre  $-0,200^\circ/\text{m}$  e  $-0,400^\circ/\text{m}$ , apresentando feições de concavidade homogênea. A assinatura 13 apresenta valores muito baixos de curvatura longitudinal ( $-0,976^\circ/\text{m}$ ) mostrando uma concavidade mais marcante.

A forma de terreno Cc/Rt está representada pelas assinaturas 5, 12 e 14. A assinatura 5 tem o valor de curvatura longitudinal próximo de zero ( $-0,027^\circ/\text{m}$ ), característica das formas retilíneas, e curvatura transversal de  $-0,697^\circ/\text{m}$ , característico de forma côncava. As

assinaturas 12 e 14 trazem valores negativos de curvatura longitudinal e valores de curvatura transversal próximos de zero, caracterizando a forma de terreno Cc/Rt.

#### 2.4.2. Comparação entre as classificações por SAM e DE

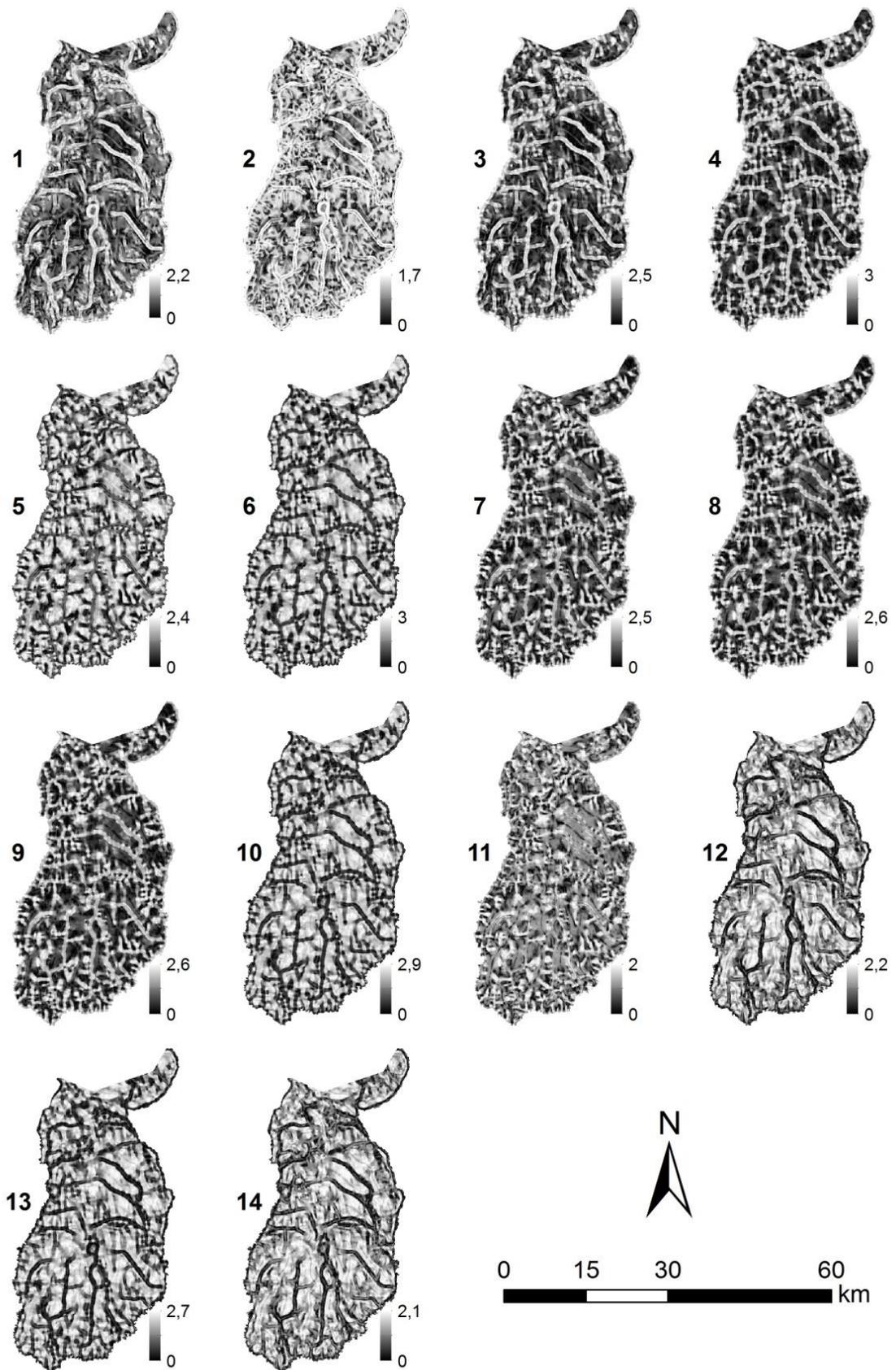
Os métodos SAM e DE apresentaram como dados de saída da classificação um conjunto de imagens de regra (*rules*), uma para cada assinatura. Essas imagens mostram o grau de similaridade (ângulo) no caso do SAM (Figura 11) e distância mínima, no caso da DE (Figura 12) entre cada pixel e cada assinatura geomorfométrica de referência.

A comparação das imagens de regra provenientes de uma mesma assinatura para os dois métodos possibilitou realçar as diferenças entre os dois classificadores. As assinaturas 1 e 8, por exemplo, correspondem à forma de terreno Rt/Rt. Essas assinaturas estão muito próximas de zero, porém são diferentes na sua configuração (Figura 9 e 10). A assinatura 1 tem o valor de curvatura longitudinal maior que a curvatura transversal. Na assinatura 8 é a curvatura transversal que apresenta um valor maior, alterando o formato da assinatura. Portanto, a assinatura 1 tem um formato em “U” e a assinatura 8, um formato de “N”.

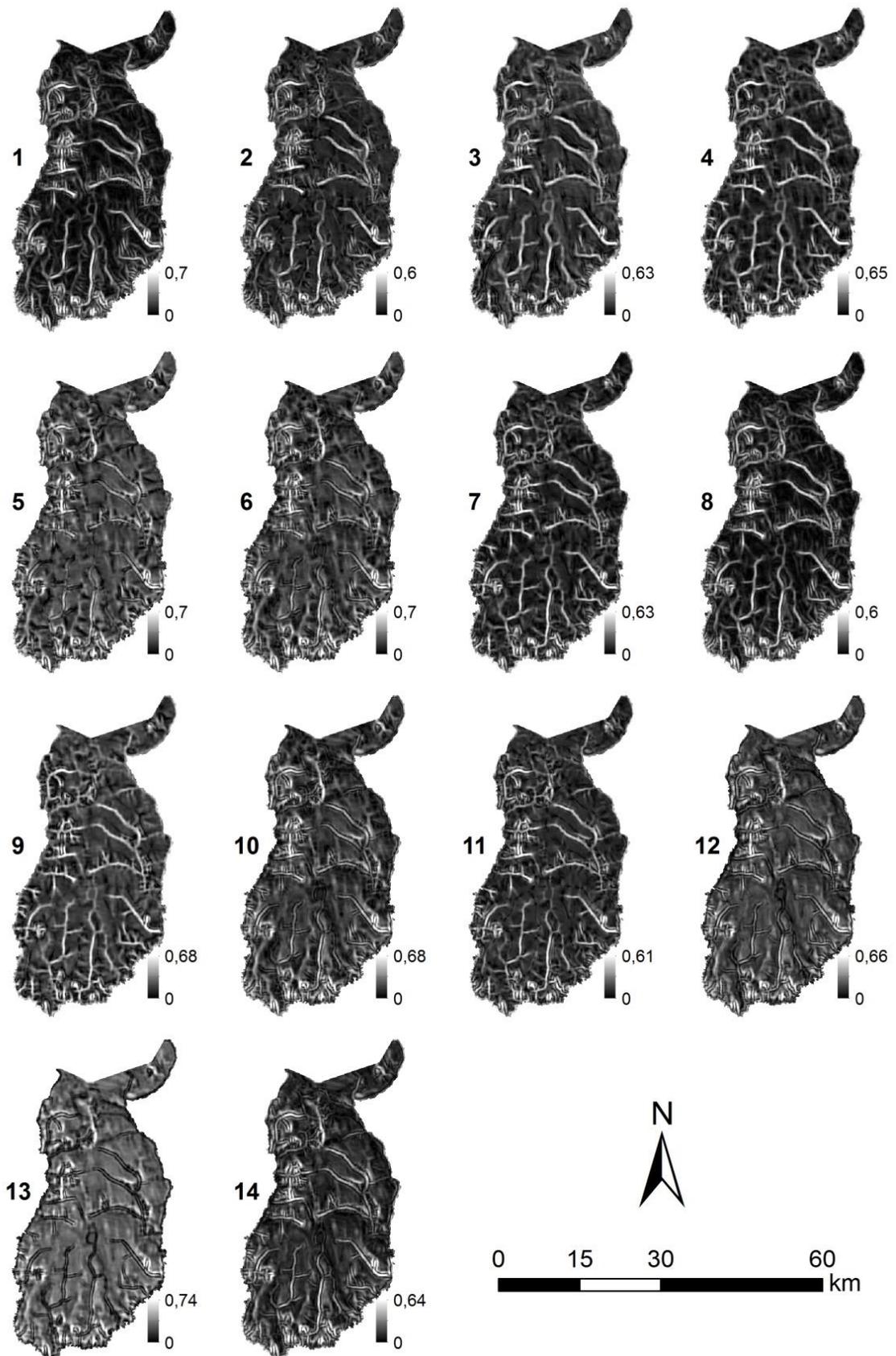
O método SAM torna nítida a diferença entre as imagens de regra das assinaturas 1 e 8 (Figura 11). Apesar de terem valores próximos de zero e representarem a mesma forma de terreno, essas duas assinaturas não são similares em seus formatos. A imagem de regra do SAM para a assinatura 1 apresenta maiores valores de radianos ao longo das drenagens principais. Enquanto, a imagem de regra do SAM para a assinatura 8 evidencia também os pequenos tributários de drenagem como áreas com pouca similaridade. Portanto, os locais com maior possibilidade de classificação são diferentes para as duas assinaturas.

Em contraposição, a DE possui dificuldade para distinguir as imagens de regra entre as assinaturas 1 e 8 (Figura 12) por apresentarem valores próximos. Neste caso, as imagens de regra dos dois métodos mostram que o SAM distingue o formato (“U” ou “N”) da assinatura de referência, enquanto a DE devido a proximidade dos valores não obtém o mesmo êxito.

A classificação do relevo pelas 14 assinaturas geomorfométricas usando o SAM é uma imagem que apresenta um relevo heterogêneo. É possível distinguir os padrões das assinaturas 5, 12 e 13 que seguem o formato das drenagens por estarem associados às formas côncavas. Porém, o restante das assinaturas se distribui em formas de terreno fragmentadas que não seguem um padrão aparente.

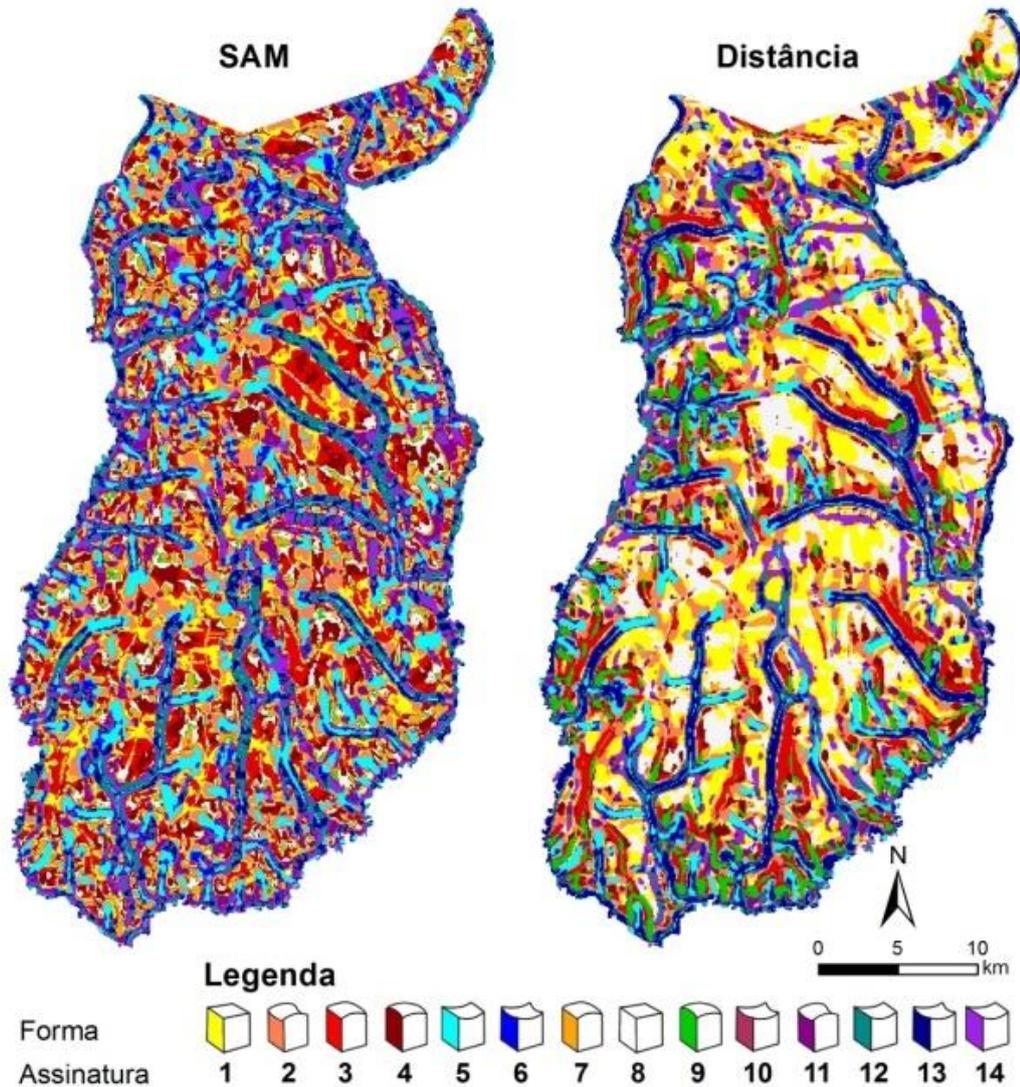


**Figura 11** - Imagens de regra geradas para cada assinatura geomorfométrica na classificação pelo método SAM. Cada pixel representa o ângulo em radianos entre a curva de referência e o pixel da imagem de curvatura.



**Figura 12** - Imagens de regra geradas para cada assinatura geomorfométrica na classificação pela DE. Cada pixel representa o ângulo em radianos entre a curva de referência e o pixel da imagem de curvatura.

O mapeamento pela DE mostra uma distribuição mais homogênea das classes. É possível observar uma presença maior das assinaturas 1 e 8. Além disso, a assinatura 13 segue os padrões de drenagem (Figura 13).



**Figura 13** - Resultados da classificação da imagem de curvaturas utilizando as 14 assinaturas geomorfométricas. A figura ilustra as principais diferenças entre o resultado da classificação pelo SAM e por DE. A legenda indica o número da assinatura e a forma de terreno que cada uma representa.

No mapeamento do SAM, a assinatura 5 foi a mais representativa, com 12,11%, seguida pela assinatura 3, com 11,25%. Por outro lado, as assinaturas 6, 9 e 10 tiveram a menor representatividade (2,82%, 2,01% e 1,65%, respectivamente). Na classificação por DE aparecem principalmente as assinaturas 1 (15,78%) e 8 (14,44%). As assinaturas 6 (2,01%) e 10 (3,19%) aparecem novamente entre as que menos aparecem (Tabela 2).

**Tabela 2** - Porcentagem de área ocupada por cada classe de assinatura geomorfométrica mapeada.

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

Comparando os resultados entre as duas classificações pela matriz de confusão é possível observar uma grande diferença entre os dois resultados (Tabela 3). O índice de precisão global mostra que apenas 43,41% dos pixels foram classificados com a mesma assinatura geomorfométrica nos dois métodos empregados.

Na matriz de confusão é possível observar que todas as classes de assinaturas geomorfométricas classificadas pelo método SAM tiveram alguma porcentagem alterada para assinatura 1 na classificação por distância euclidiana. Isso confirma as características suaves das formas de terreno da área de estudo, que tem os valores de curvatura próximos de zero.

A assinatura 2 foi a mais alterada para assinatura 1 (42,13%). Isso pode ser explicado pelo formato das assinaturas. Ambas tem características de formas de terreno transacionais, com a curvatura longitudinal positiva e a curvatura transversal com valores negativos. A principal diferença é a proximidade que os valores estão de zero. Portanto, se considerarmos apenas o ângulo espectral, os pixels com essa configuração de curvaturas podem ser classificados como assinatura 2. Entretanto, considerando a distância entre os pixels, a maioria será classificada como assinatura 1 por estarem mais próximos de zero.

A assinatura geomorfométrica 8 também aumentou a área classificada pela DE. Porém, por ter apenas valores positivos de curvaturas na sua configuração, apenas algumas assinaturas com valores negativos passaram a ser assinatura 8. A assinatura 11, que tem características de transição, com o terreno tanto convexo quanto côncavo, teve 32,95% da sua área classificada como assinatura 8 pela DE. Assim como na relação entre as assinaturas 1 e

2, essa alteração ocorreu pela semelhança entre as assinaturas. Nesse caso, com os valores de curvatura longitudinal são menores que os valores de curvatura transversal.

As classes de assinaturas geomorfométricas menos alteradas entre as duas classificações foram 2, 5 e 13 (Tabela 3). A principal característica dessas assinaturas são os valores negativos de curvatura. No entanto, a assinatura 12 foi a mais alterada, mantendo apenas 25,86% da área classificada no SAM. A maior parte dessa classe de assinatura passou a ser assinatura 13, com características similares.

**Tabela 3** - Matriz de Confusão de porcentagem entre a classificação pelo SAM e a DE.

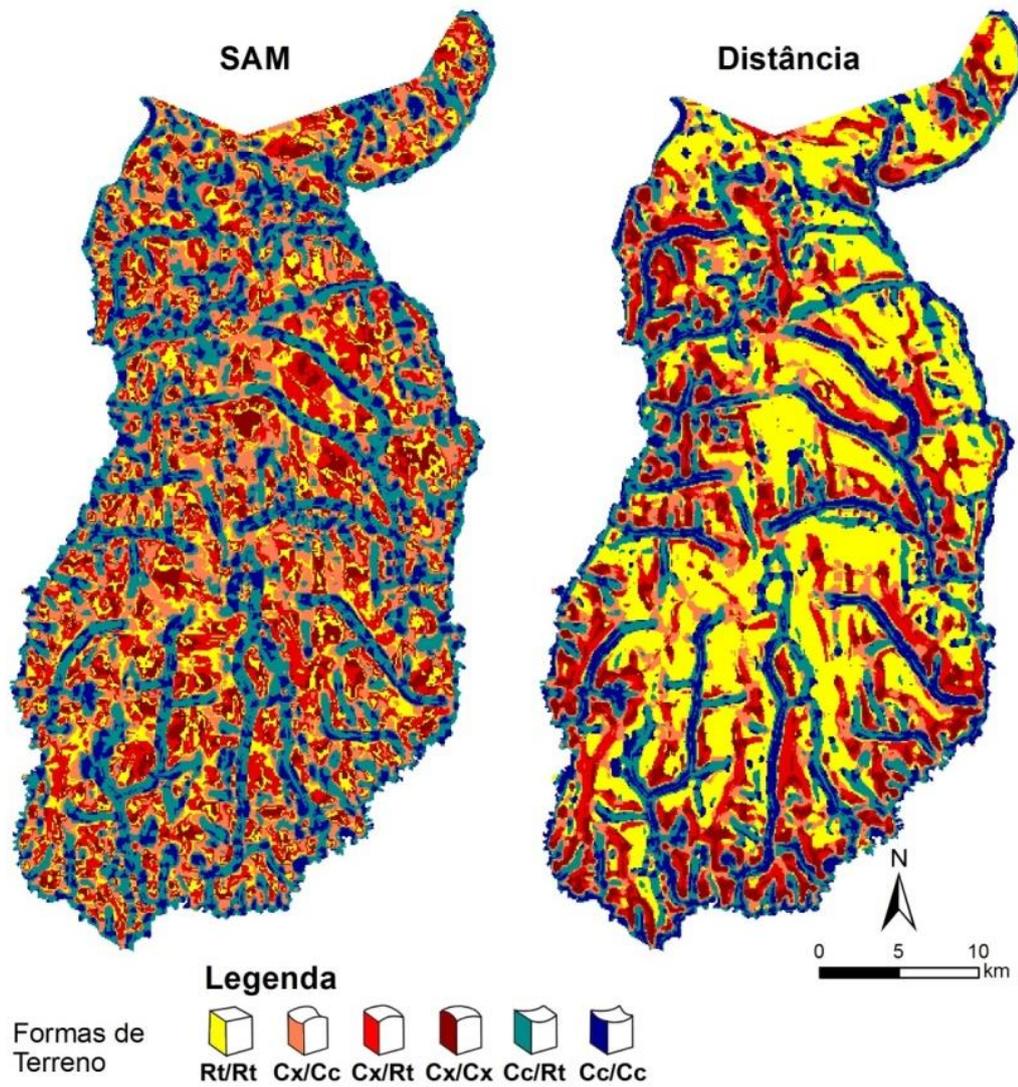
Ass.	SAM														Total	
	Geom.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13		14
DE	1	42,62	42,13	26,26	2,35	21,91	9,9	2,37	0,96	0,93	7,9	7,74	3,81	5,14	14,26	15,78
	2	29,18	54,58	0,99	0	6,46	0	0	0	0	0	0,1	0	0	0,03	7,87
	3	25,75	0,66	42,58	5,09	0	0	0,38	0,28	0,25	0	0	0	0	0	7,29
	4	0	0	9,55	40,61	0	0	0	5,68	0	0	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

#### 2.4.3. Resultado do mapeamento das seis formas de terreno e comparação entre os classificadores SAM e DE

Para facilitar a interpretação das classificações, as classes mapeadas de assinaturas geomorfométricas foram unidas conforme a proposta de formas de terreno de Wood (1996): Cc/Cc; Cc/Rt; Cx/Cc; Cx/Cx; Cx/Rt; Rt/Rt.

Ao definir estas formas de terreno, as diferenças no comportamento do relevo em cada classificação ficam mais evidentes. No resultado do mapeamento por SAM, as formas de terreno são mais fragmentadas. A DE gerou agrupamentos maiores evidenciando um relevo mais contínuo e menos fragmentado. A avaliação visual dos dois resultados mostra um relevo com muitas áreas de transição no resultado do SAM, e um relevo predominantemente retilíneo no resultado da DE (Figura 14).

As observações realizadas a campo confirmam uma organização das vertentes mais homogêneas e contínuas. Os topos apresentam um padrão de relevo muito suave entre as formas Cx/Rt e Cx/Cx, que se confundem a campo com formas retilíneas. Os resultados obtidos pela DE são mais coerentes com as observações feitas a campo.



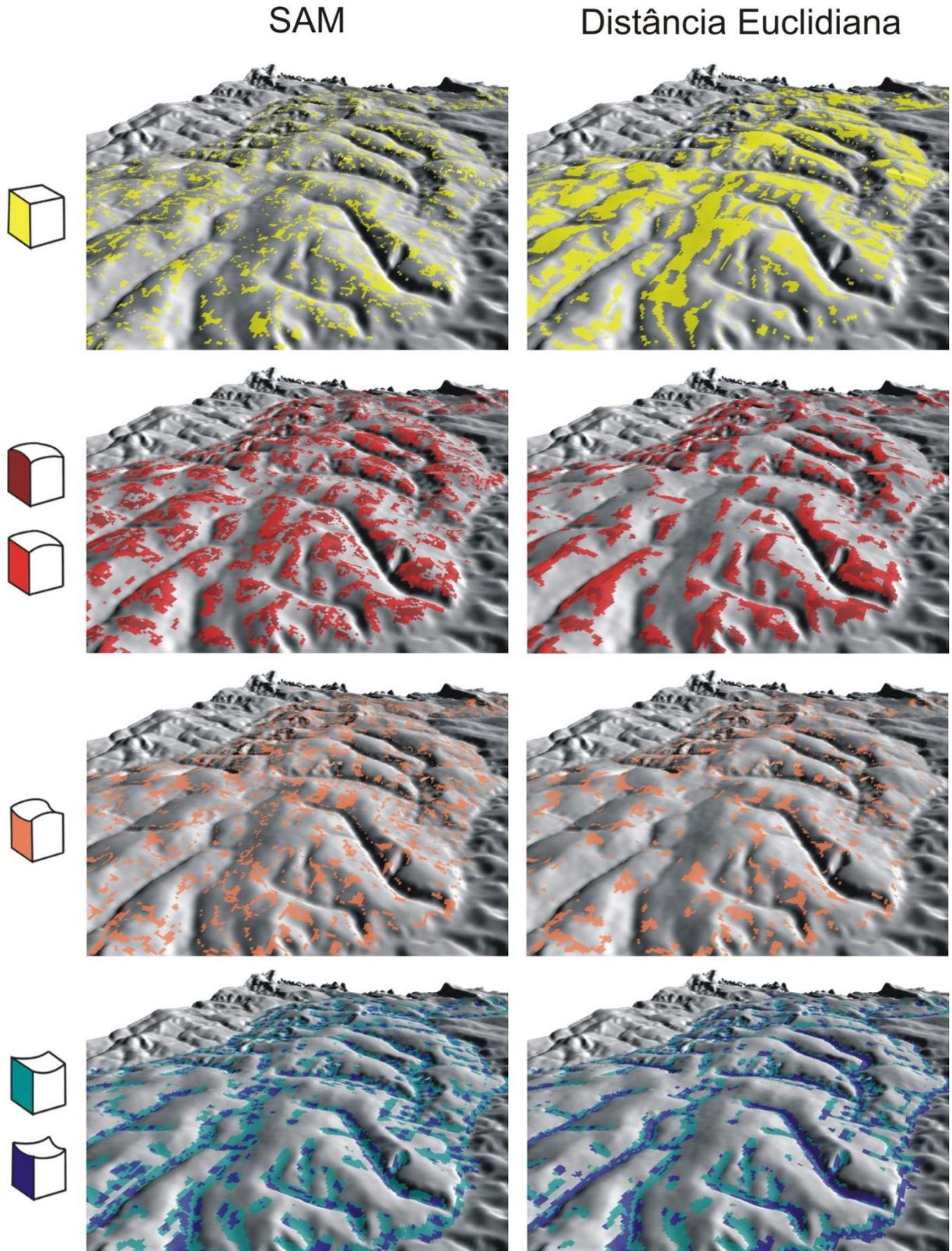
**Figura 14** - Resultados do mapeamento das seis formas de terreno, utilizando o método SAM (esquerda) e a DE (direita).

Na classificação por SAM, a forma de terreno Cc/Rt é a mais representativa (26,64%), seguida pelas formas Cx/Rt e Cx/Cc (18,56% e 17,68% respectivamente). O mesmo ocorre no trabalho de Vasconcelos et al. (2012), onde as classes de formas de terreno que mais aparecem são a Colina (correspondente à forma Cx/Rt do presente trabalho), seguida pelas Depressões Entalhadas e de Cabeceira (Cc/Rt) e pelo Colo (Cx/Cc). Esses resultados mostram que o SAM apresenta uma tendência em delimitar essas formas de terreno. Por outro lado, as que menos aparecem são Rt/Rt (14,39%), Cc/Cc (12,21%) e Cx/Cx (10,51%) (Tabela 4). Nesta classificação, o ponto mais elevado da área de estudo tem forma de terreno Cx/Rt (1044 m) e o mais baixo foi classificado como Cc/Rt (815 m). Essas informações indicam um relevo em processo de dissecação com o entalhamento do talvegue e divisores cortados por algumas áreas de captura de drenagem. A classificação das áreas com relevo formas côncavas

correspondem ao padrão observado a campo. Entretanto, o relevo nos interflúvios mostra-se mais fragmentado na classificação do SAM do que é possível observar na paisagem.

As formas de terreno com as maiores médias de altitude estão associadas aos divisores de água. As formas com padrões convexos, principalmente a forma Cx/Cx, apresentam a maior média de altitude (943,11 m) nas duas classificações. Esta forma de terreno aparece em pequenas áreas isoladas onde existe relevo remanescente. Além disso, apresenta a menor média de declividade entre as formas de terreno mapeadas pelo SAM (1,90°), enquanto que na DE esse valor ficou em 2,17°. Isso mostra que essas áreas mapeadas pelo SAM não são picos acentuados, e sim topos suaves que podem ser vistos como formas Rt/Rt no campo (Figura 15). Na classificação por SAM, as formas de terreno com maiores médias de declividade são as que têm características côncavas: Cc/Rt (2,58°) e Cc/Cc (2,54°) (Tabela 4). Esses valores de declividade mostram que as porções convexas da área são suaves e as porções côncavas são mais entalhadas, evidenciando um processo de entalhamento do talvegue (Figura 16).

Na classificação por DE, a forma de terreno que mais aparece é a Rt/Rt (30,22%), devido aos valores das curvaturas que se concentram próximos de zero na maior parte da área de estudo. A segunda forma de terreno mais representativa é Cc/Rt (18,62%). Essa forma de terreno também teve uma grande área de classificação no método SAM. Por outro lado, as formas de terreno com menor representatividade no mapeamento por DE são Cx/Cx (10,13%), Cx/Cc (12,12%) e Cx/Rt (13,83%) (Tabela 4). As formas Cx/Rt e Cx/Cx só aparecem nos divisores de drenagem. A forma Cx/Cc está e nas porções de transição entre as áreas convexas ou retilíneas com as áreas côncavas. São formas importantes na detecção de áreas em processo de formação de captura de drenagem.



**Figura 15** - Comparação entre os resultados da classificação com SAM e com DE para as formas de terreno separadas com visualização em 3D.

Com a DE, a forma de terreno do pixel mais alto da área de estudo é Cx/Cx. Entretanto, a forma com a maior média de altitude é Cx/Rt (940,04 m). Apesar de estar na

maior parte da área, a forma Rt/Rt apresenta o menor desvio padrão de altimetria (30,91), mostrando que essas áreas estão concentradas próximas da média (939,16 m). Essa última forma de terreno apresenta a menor média de declividade (1,81°) com o menor desvio padrão (0,81), confirmando o padrão suave-ondulado do relevo da área. Apesar desse padrão de relevo, as formas de terreno Cc/Cc e Cc/Rt apresentaram as maiores médias de declividade (2,76° e 2,60° respectivamente), assim como na classificação por SAM. Esses dados confirmam um padrão de drenagem levemente encaixada da região, como foi observado em campo.

Os padrões de relevo obtidos por DE são mais coerentes com os observados na paisagem. As formas Cx/Cx e Cx/Rt são as dominantes nos topos e divisores de drenagem, associados a solos rasos, especialmente Cambissolos e Plintossolos Pétricos. As feições Rt/Rt e Cx/Cc estão associadas principalmente às rampas de colúvio, que apresentam um predomínio de Latossolos, em especial Vermelho e Vermelho-Amarelo. As drenagens são bem evidenciadas em padrões alongados e apresentam formas de terreno Cc/Rt e Cc/Cc.

A tabela 4 apresenta de maneira detalhada a estatística descritiva de altimetria e declividade para o mapeamento das formas de terreno com o SAM e DE.

**Tabela 4** - Estatística descritiva com altimetria e declividade com os resultados do mapeamento das formas de terreno com o classificador SAM e com a DE.

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

A tabulação cruzada foi também utilizada para descrever as principais diferenças entre os resultados dos mapeamentos das seis formas de terreno. O índice de precisão global

aumentou em relação às 14 assinaturas, atingindo 52,27%, onde mais da metade dos pixels representaram a mesma forma de terreno com os dois métodos de classificação. Apesar de os resultados dos mapeamentos das seis formas serem mais semelhantes entre si do que os resultados das classificações com as 14 assinaturas, os índices de comparação entre os dois métodos continuam indicando baixa precisão.

As formas de terreno 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%). A maior parte das áreas dessas duas classes que mudaram com o classificador continuou apresentando forma côncava, onde 21,47% da forma de terreno Cc/Rt classificada por SAM passou a ser Cc/Cc com a DE e 16,6% de Cc/Cc passou a ser Cc/Rt (Tabela 5). As outras quatro formas de terreno tiveram uma sobreposição menor que 50% na comparação entre os dois classificadores. Grande parte das áreas mapeadas com formas convexas na classificação por SAM passaram a ser Rt/Rt com a DE. As formas de terreno associadas às drenagens são muito próximas entre as classificações por SAM e por DE.

**Tabela 5** – Tabulação cruzada de porcentagem comparando os resultados da classificação de das seis formas de terreno por SAM com a DE. O resultado de SAM foi considerado o dado de entrada da tabulação.

	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

## 2.5. CONCLUSÕES

A abordagem proposta no trabalho foi uma comparação entre duas metodologias de mapeamento das formas de terreno por meio de assinaturas geomorfométricas. A seleção de assinaturas geomorfométricas foi realizada a partir da geometria do convexo e na classificação foram testadas duas métricas distintas (similaridade e distância): *Spectral Angle Mapper* e Distância Euclidiana. O uso de assinatura geomorfométrica para o mapeamento das formas de terreno proporcionou uma flexibilidade na quantidade e natureza das formas de terreno mapeadas. A escolha das assinaturas geomorfométricas é uma etapa subjetiva que exige o conhecimento prévio do analista. Neste trabalho foram definidas 14 assinaturas geomorfométricas para o mapeamento das seis formas de terreno conforme proposta de Wood

(1996): Convexo/Convexo (Cx/Cx); Côncavo/Côncavo (Cc/Cc); Convexo/Côncavo (Cx/Cc); Côncavo/Retilíneo (Cc/Rt); Convexo/Retilíneo (Cx/Rt); Retilíneo/Retilíneo (Rt/Rt).

A classificação das 14 assinaturas pelo método SAM evidenciou principalmente as assinaturas 5 e 11. Essas assinaturas indicam formas de terreno de transição e côncavas, respectivamente. Por outro lado, o resultado da classificação por DE contemplou principalmente as assinaturas 1 e 8, ambas com padrões retilíneos. A tabulação cruzada permitiu uma avaliação detalhada das principais diferenças entre os dois métodos. Os resultados mostraram que aproximadamente 30% dos pixels mapeados com as 14 assinaturas com o SAM se concentraram entre as assinaturas 1 e 8 com a DE. Isso mostra que o método SAM pode ser mais adequado para detalhar as formas de terreno de áreas com o relevo acidentado e fragmentado. Por outro lado, o método de DE é mais apropriado para a classificação supervisionada das formas de terreno em ambientes com relevo plano e suave, como é o caso do CIF.

Considerando apenas as seis formas de terreno, observa-se pela tabulação cruzada um aumento de áreas semelhanças entre os dois métodos. O SAM apresentou um mapeamento com predomínio de formas Cc/Rt, Cx/Rt e Cc/Cx, indicando um terreno heterogêneo com muitas áreas de transição. A DE mostrou um terreno com o predomínio das formas Rt/Rt, mais coerente com o observado a campo. As áreas côncavas associadas às drenagens foram mapeadas com resultados semelhantes entre os dois métodos testados, indicando um padrão de drenagens encaixadas.

### *CAPÍTULO 3 – CONSIDERAÇÕES FINAIS*

O relevo é o elemento central da hierarquia espaço-temporal da paisagem. A superfície terrestre é formada pela ação do clima e das forças geológicas ao longo do tempo, e influencia diretamente a organização espacial das sociedades. Portanto, o relevo deve ser estudado de forma qualitativa e quantitativa. A geomorfometria é uma das vertentes de estudos quantitativos do relevo. Utiliza atributos morfométricos derivados da altimetria para mapear e analisar as formas da superfície terrestre. Os limites naturais das formas de terreno agem diretamente sobre a formação de processos como erosão e denudação (áreas convexas), acumulação e deposição (áreas côncavas) ou processos geomórficos como deposição aluvial ou eólica e influenciam na dinâmica dos ecossistemas e na distribuição espacial da vegetação natural ou plantada. A abordagem adotada neste trabalho contribui para o avanço das técnicas de classificação geomorfométrica abordando a classificação supervisionada de assinaturas geomorfométricas.

Uma assinatura geomorfométrica é uma curva que descreve um conjunto de atributos morfométricos e separa diferentes formas topográficas na paisagem. Essa abordagem proporciona uma flexibilidade na escolha da quantidade e da natureza das formas de terreno em um mapeamento geomorfométrico. O processo metodológico para a escolha das assinaturas geomorfométricas de referência adaptado das técnicas de sensoriamento remoto permitiu a união de diversos parâmetros do terreno em uma única imagem de curvaturas e sua classificação. Portanto, essa adaptação pode ser considerada uma importante ferramenta para o mapeamento das formas de terreno.

As assinaturas geomorfométricas podem ser a informação de entrada de diversas técnicas de classificação supervisionada ou não-supervisionada de formas de terreno. Os dois métodos de classificação supervisionada utilizados nesse trabalho podem ser utilizados para esse fim. O método de similaridade SAM mostrou uma superfície com formas fragmentadas, com predomínio das formas Cx/Rt e Cc/Rt e com muitas áreas de Cx/Cc. No método de distância DE as formas que mais apareceram são Rt/Rt e Cc/Rt. Esse método mostrou um relevo plano e menos fragmentado que o anterior, com concavidade mais acentuada em relação à convexidade do local. Não foi possível determinar o método mais eficiente para o mapeamento das formas de terreno da área de estudo. Entretanto, o resultado da DE foi coerente com o relevo do CIF. O SAM pode ser mais adequado para mapear áreas com o relevo mais movimentado. Nesse sentido, trabalhos futuros são necessários para testar a

eficiência de cada um dos métodos em diferentes em áreas com diferentes configurações morfométricas.

Além disso, é importante confirmar essas informações em campo ou relacionando os resultados dos dois métodos com elementos da paisagem. Deve-se verificar se os resultados de mapeamento têm relação com a distribuição dos solos e da vegetação como forma de validação das informações geradas. Outras técnicas de classificação supervisionadas também podem ser testadas no mapeamento das formas de terreno com assinaturas geomorfométricas para aumentar a quantidade de possibilidades de técnicas de mapeamento. Outros elementos devem ser levados em consideração, como o tamanho da janela de mapeamento e a resolução espacial do MDE. Cada ambiente geomorfológico distinto deve ser mapeado com o uso de técnicas adaptadas.

O limite de cada forma de terreno tem o potencial de guardar diferentes atributos de solos e influenciar diferentes processos ecológicos e geomorfológicos. Portanto, o mapeamento das formas de terreno pode subsidiar a escolha de áreas representativas para diversos estudos sobre o funcionamento da dinâmica de elementos bióticos e abióticos. Logo, tem papel fundamental nos estudos voltados para a gestão dos recursos naturais.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- ARREL, K.E.; FISHER, P.F.; TATE, N.J.; BASTIN, L. Fuzzy c-means classification of elevation derivatives to extract the morphometric classification of landforms in Snowdonia, Wales. **Computes & Geosciences**. v. 33, p. 1366-1381, 2007.
- ARRUDA, M.B.; PROENÇA, C.E.B.; RODRIGUES, S.C.; CAMPOS, R.N.; MARTINS, R.C.; MARTINS, E.S. Ecorregiões, Unidades de Conservação e Representatividade Ecológica do Bioma Cerrado. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P.; RIBEIRO, J.F. **Cerrado: Ecologia e Flora**. [S.l.]: Embrapa, v. 1. Cap. 8, p. 229-270. 2008.
- 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.
- BERHE, A.A. Decomposition of organic substrates at eroding vs. depositional landform positions. **Plant Soil**. v. 350, p. 261-280, 2012.
- 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 Brasílica**. 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. 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.
- 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.
- BRITO, L.F.; SOUZA, Z.M.; MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAZETTA, D.A.; CALZAVARA, S.A.; OLIVEIRA, L. Influência de formas do relevo em atributos físicos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, v. 36, n. 6, p. 1749-1755, 2006.
- 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.
- CAMARGO, L.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; HORVAT, R.A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. I - mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 32, p. 2269-2277, 2008.
- 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. 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.

CARVALHO JUNIOR, 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.; MENESES, P.R. Spectral Correlation Mapper (SCM): an improving Spectral Angle Mapper (SAM). **Proceedings of the Nineth 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 seqüencial da transformação por fração de ruído mínima. **Brazilian Journal of Geophysics**. v. 20, n. 1, p. 31-41, 2003.

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.

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.; FRETAS, 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; SCO-MI **Zoneamento ecológico-econômico da região integrada de desenvolvimento do Distrito Federal: fase I**. Rio de Janeiro: [s.n.], v. 2, 2003. p. 1-29.

DE GRYZE, S.; SIX, J.; BOSSUYT, H.; OOST, K.V.; MERCKX, R. The relationship between landform and the distribution of soil C, N and P under conventional and minimum tillage. **Geoderma**. v. 144. [s.n] p 180-188, 2008.

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. 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 JUNIOR, 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.

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.

IBGE. Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. **Manual Técnico de Geomorfologia**. 2. Ed. Rio de Janeiro, RJ: IBGE, 2009.

IBGE. **Mapa de biomas do Brasil**, 2004. Disponível em: <[www.mapas.ibge.gov.br/biomas2/viewer.htm](http://www.mapas.ibge.gov.br/biomas2/viewer.htm)>. Acesso em: 28 ago 2012.

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.

KOHONEN, T., 2001. **Self Organizing Maps**, 3rd Ed. Springer, New York.

KRUSE, F.A.; LEFKOFF, A.B.; BOARDMAN, J.W.; HEIEDBRECHT, 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, [s.n.], p. 437-456. 1993.

- KUMHÁLOVÁ, J.; KUMHÁLA, F.; KROULÍK, M.; MATĚJKOVÁ, S. The impact of topography on soil properties and yield and the effects of weather conditions. **Precision Agriculture**. v. 12, p. 813-830, 2011.
- 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.
- LEÃO, M.G.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; SIQUEIRA, D.S; PEREIRA, G.T. O relevo na interpretação da variabilidade espacial dos teores de nutrientes em folha de citros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 14, n. 11, p. 1152-1159, 2010.
- 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.; 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.
- 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 JUNIOR, O.A.; GUIMARÃES, R.F. Ecologia de Paisagem: conceitos e aplicações potenciais no Brasil. **Documentos. Embrapa Cerrados**. Planaltina, DF, p. 33. 2004.
- MARTINS, E.S; CARVALHO JUNIOR, O.A.; VASCONCELOS, V.; COUTO JUNIOR, A.F.; OLIVEIRA, S.N.; GOMES, R.A.T; REATTO, A. Relação Solo-Relevo em Vertentes Assimétricas no Parque Nacional Serra dos Órgãos, RJ. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, nº 1, p. 45-62. 2007.
- 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.; DE 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.

- MINÁR, J.; EVANS, I.S. Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping. **Geomorphology**, v.95, p.236-259, 2008.
- MOTTA, P.E.F; CARVALHO FILHO, A.; KER, J.C.; PEREIRA, N.R.; CARVALHO JUNIOR, W.; BLANCANEUX, P. Relações solo-superfície geomórfica e evolução da paisagem em uma área do Planalto Central Brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 6, p. 869-878, 2002.
- MYERS, N.; MITTERMEIER, R.A.; MITTERMEIER, C.G.; FONSECA, G.A.B.; KANT, J. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, p. 853-858, 2000.
- NASCIMENTO, M.D.; SOUZA, B.S.P. Mapeamento Geomorfológico da área abrangida pela carta topográfica de Santa Maria, RS como subsídio ao planejamento ambiental. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 11, n. 2, p. 83-90, 2010.
- 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 hidrologicamente 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. 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, nº. 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.
- SALVADOR, M.M.S.; LIBARDI, P.L.; BRITO, A.S.; MOREIRA, N.B. Estabilidade temporal e variabilidade espacial da distribuição da armazenagem de água no solo numa

- sucessão feijão/aveia-preta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 36, [s.n], p. 1434-1447, 2012.
- SANCHEZ, R.B.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; BARACAT NETO, J.; SIQUEIRA, D.S.; SOUZA, Z. M. Mapeamento das formas do relevo para estimativa de custos de fertilização em cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**. v. 32, n. 2, p. 280-292, 2012.
- SANCHEZ, R.B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T.; MARTINS FILHO, M.V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**. v. 68, n. 4, p. 1095-1103, 2009.
- SCHMIDT, J.; HEWITT, A. Fuzzy land element classification from DTMs based on geometry and terrain position. **Geoderma**. v. 121, 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.
- SILVA, J.M.C.; BATES, J.M. Biogeographic Patterns and Conservation in the South American Cerrado: A Tropical Savanna Hotspot. **Bioscience**, v. 52, p. 225-234, 2002.
- SINAI, G.; ZASLAVSKY, D.; GOLANY, P. The effect of soil surface curvature on moisture and yield - Beer Sheba observation. **Soil Science**. v. 132, p. 367-375. 1981.
- SMITH, B.; SANDWELL, D. Accuracy and resolution of Shuttle Radar Topography Mission data. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 9, 1467, 2003.
- 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.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade Espacial de Atributos Físicos do Solo em Diferentes Formas do Relevo sob Cultivo de Cana-De-Açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v. 28. [s.n], p. 937-944, 2004a.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; BARBIERI, D.M. Small relief shape variations influence spatial variability of soil chemical attributes. **Sci. Agric**. v. 63, n. 2, p. 161-168, 2006.
- SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; MOREIRA, L.F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**. v. 34, n. 6, p. 1763-1771, 2004b.
- 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.
- VARELIANO, M.M. Dados Topográficos. In: FLORENZANO, T. G. **Geomorfologia: Conceitos e Metodologias Atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. Cap. 3, p. 72-104.

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.

WEISS, A.D. Topographic position and landforms analysis. **Poster Presentation, ESRI Users Conference**, San Diego, CA. 2001.

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.