

Mapeamento das formas de terreno por meio de assinatura geomorfológica como subsídio para a descrição da paisagem da bacia hidrográfica do alto rio Preto

João Paulo Sena-Souza¹
Glauber das Neves²
Vinicius Vasconcelos¹
Éder de Souza Martins²
Antonio Felipe Couto Junior³

¹Universidade de Brasília - UnB
Departamento de Geografia - *Campus* Universitário Darcy Ribeiro, CEP 70910-900, Brasília, DF
E-mail: {jpsenasouza, vinicius.vascoza}@gmail.com

²Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa Cerrados
BR-020 km 18 Caixa Postal 08223 CEP: 73301-970 Planaltina, DF
E-mail: {glauber.unb, martieder}@gmail.com

³Universidade de Brasília - UnB
Campus Planaltina - Área Universitária n.º 1 Vila Nossa Senhora de Fátima, CEP 73300-000,
Planaltina, DF
E-mail: antoniofelipejr@gmail.com

Abstract. The aim of this paper was to map the landforms by applying remote sensing techniques and describe the relationship between landforms and landscape. The input data was the SRTM DEM. Curvatures derived from altimetry (Transverse, Longitudinal, Minimum and Maximum) were extracted considering a filter kernel with 15x15. The curvatures were normalized and combined so that each represent one band of image. The pixels were inserted into an n-dimensional viewer that enabled the extraction of geomorphometric signatures. Six signatures regarding the main landforms derived from the combination of three elementary shapes (concave, convex and straight). The signatures were inserted into the SAM classifier. The mapped landforms were related to the landscape through overlap with a Landsat 8 image. The method could map the landforms: Convex/Convex (18.82%); Convex/Rectilinear (19.84%); Convex/Concave (16.83%); Rectilinear/Rectilinear (11.01%); Concave/Rectilinear (13.8%); Concave/Concave (19.71%). The mapping showed the soft-wavy relief pattern with slope increased near the drainage. Moreover, it showed that the vegetation of the area respond directly to the landforms, indicating the influence of the landforms in the landscape productivity. The concave landforms follow the watercourses and are related to the forest formations. Studies are needed to show the possibilities of using the spectral classification of geomorphometric signatures in terrain analysis. Further studies should measure and describe the nature of the relationship between landforms and vegetation on a regional scale in order to improve the understanding of the landscape functioning and assist environmental planning.

Palavras-chave: geomorphometry, mapping, landforms, Digital Elevation Model, geomorfometria, mapeamento, formas de relevo, Modelo Digital de Elevação

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 pelos campos das ciências computacionais, 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) para a classificação das formas do terreno, que estão relacionadas com a delimitação de bacias de drenagem, movimento de massa, mapeamento de solos, fitofisionomias, dentre outros.

Com a maior disponibilização de MDE nos últimos anos e o desenvolvimento de técnicas de análise dos parâmetros morfométricos em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) houve um avanço significativo na geomorfometria para a classificação e análise

numérica de formas de terreno (Saha et al., 2011; Ehsani e Quiel 2008, 2009; Ehsani et al. 2010; Vasconcelos et al. 2012).

Os principais métodos desenvolvidos utilizam uma chave de classificação dos atributos de terreno considerando um conjunto de regras pré-estabelecidas. Nesta concepção, Wood (1996) propõe um método 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 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. Conseqüentemente, as curvaturas de Mínima e Máxima são utilizadas em áreas de relevo mais suave. Desta forma, a combinação das curvaturas apresenta uma relação excludente de acordo com relevo que será modelado.

Dentre as técnicas de quantificação das variáveis morfométricas para representação das formas do terreno está a utilização das assinaturas geomorfométricas (Vasconcelos et al. 2012). O conceito de assinatura vem sendo adaptado para a geomorfometria por meio de técnicas de sensoriamento remoto há décadas (Pike, 1988). Uma assinatura geomorfométrica pode ser considerada como um conjunto de medidas que descreve e separa diferentes formas topográficas na paisagem (Vasconcelos et al. 2012). As vantagens no uso dessa ferramenta de análise da paisagem estão na complexidade de possibilidades de representação do terreno.

Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho é classificar as formas do terreno por meio de assinatura geomorfométrica e descrever suas relações com a paisagem.

2. Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Alto Rio Preto (BARP) está localizada na região central do bioma Cerrado, na porção leste da Ecorregião do Planalto Central, como um dos tributários da Bacia Hidrográfica do São Francisco. Apresenta divisores comuns com a Bacia do São Bartolomeu (Bacia Platina) e Bacia do Paranã (Tocantins-Araguaia).

A BARP localiza-se entre as coordenadas 8287407,8m-8204771,6m e 216554,5m-294335,1m no sistema de coordenadas geográficas WGS 1884, UTM Zona 23 Sul. Tem aproximadamente 3775,1 km², com 54,25% de sua área total no Estado de Goiás, nos municípios de Luziânia e Cristalina; 35,43% no Distrito Federal; e 10,32% em Minas Gerais, no município de Unaí (Figura 1).

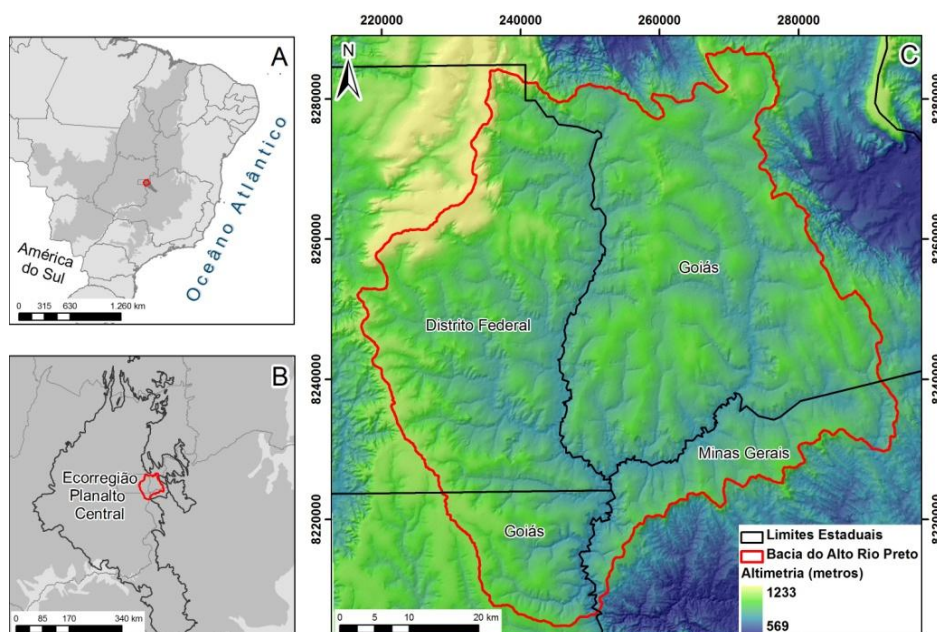


Figura 1. Localização e altimetria da bacia hidrográfica do alto rio Preto.

A área de estudo está inserida na Faixa Brasília de Dobramentos, com evolução proveniente da colisão entre os crátons São Francisco e Amazônico no final do período Neoproterozóico (Almeida, 1977). As rochas que ocorrem na BARP são dos grupos Canastra, Paranoá e Bambuí. As rochas do Grupo Bambuí estão distribuídas na maior parte da bacia. Esse grupo está representado principalmente pelo Sub-Grupo Pareopeba com presença de siltitos e argilitos e presença de lentes de calcário (Campos et al., 2006).

O relevo é sustentado principalmente pela presença de couraça laterítica nas bordas. As condições ambientais e climáticas favorecem o acúmulo de Ferro (Fe) principalmente na forma de hematita (Fe_2O_3) nos limites do relevo suave-ondulado. O Fe se desloca até o interior e se dirige para as bordas por acepção lateral, onde encontra a zona de déficit hídrico formando uma couraça maciça ferruginosa que constitui a Cobertura Detrito-Laterítica ferruginosa.

As principais classes de solos encontradas na área de estudos são os Latossolos Vermelho e Vermelho-Amarelo, Cambissolos, Argissolos e Solos Hidromórficos. As características de relevo estável de plano a suave ondulado com o padrão convexo favorece a presença dos Latossolos. Os solos Hidromórficos estão associados à influência do lençol freático e acúmulo de água nas superfícies deprimidas e côncavas.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região é tropical úmido de savana com inverno seco (Aw). A principal característica é a sazonalidade intensa com chuvas concentradas entre os meses de outubro e abril.

3. Material e Métodos

O dado de entrada para a classificação das formas do terreno é o Modelo Digital de Elevação (MDE) proveniente da missão *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Essa missão adquiriu dados topográficos 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). O MDE da SRTM possui limitações como vazios (ausência de dados em determinadas áreas), presença de dados espúrios, presença de vórtices e definição errônea de linhas de drenagem (Rabus et al., 2003; Luedeling et al., 2007). Para diminuir a influência desses valores espúrios foi realizada uma filtragem de mediana de janela 15x15 no MDE.

Este trabalho foi realizado seguindo a metodologia para o mapeamento das formas do terreno por meio de assinaturas geomorfométricas, proposta por Vasconcelos et al. (2012), considerando quatro curvaturas derivadas da altimetria baseado no conceito de Wood (1996), utilizando os conjuntos de curvaturas Longitudinal e Transversal, Mínima e Máxima na sua classificação. Esse formato de classificação divide a superfície em seis feições morfométricas (Figura 2a) baseadas nas combinações dos três componentes para a delimitação das formas do terreno (Figura 2b).

As imagens de curvatura foram extraídas do MDE SRTM com uma dimensão de janela 15 x 15 para diminuir a presença de pequenos polígonos e valores espúrios. Alguns valores discrepantes aparecem no interflúvio e nos vales e podem alterar o desempenho das etapas subseqüentes. Portanto, os pixels com esses valores foram identificados e retirados. As imagens 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 apresenta valores referentes a cada curvatura (banda), estabelecendo uma assinatura geomorfométrica (Vasconcelos et al., 2012), de forma semelhante ao agrupamento de imagens multibandas de sensores orbitais. De forma geral, os valores negativos de curvatura representam formas de terreno Côncavo. Por outro lado, valores positivos

representam a forma Convexa. As porções Retilíneas do terreno aparecem onde os valores das curvaturas estão próximos de zero.

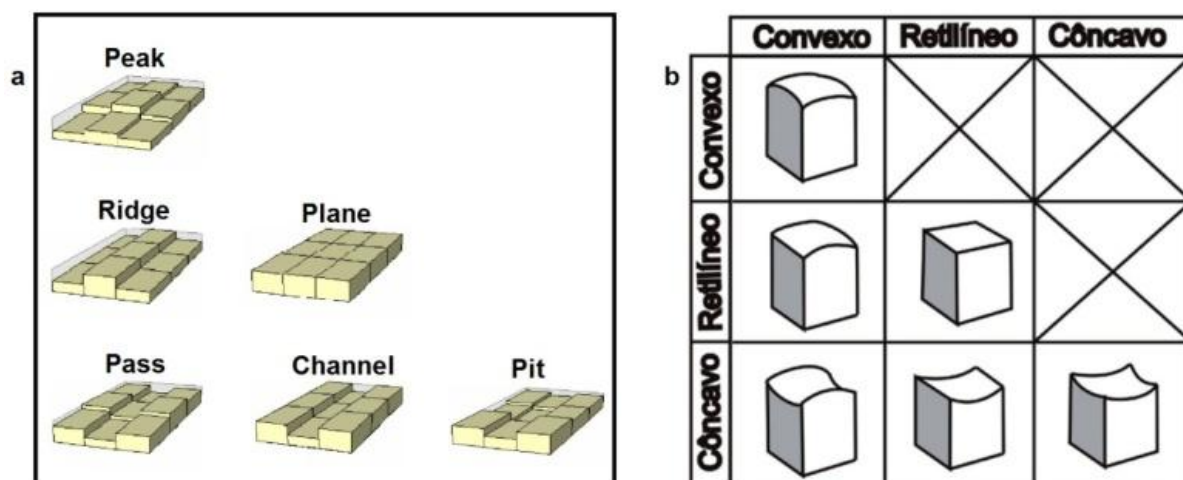


Figura 2. Feições morfométricas (a) e as respectivas Formas do Terreno baseadas nas curvaturas Longitudinal, Transversal, Mínima e Máxima (b). Adaptado de Wood (1996).

Para facilitar a classificação foi realizada uma normalização onde cada banda de curvatura foi dividida pelo seu valor máximo absoluto para que os valores fossem distribuídos entre 1 e -1. Assim, é possível segmentar as classes em intervalos de valores: -1 a -0,6 (côncavo/côncavo); -0,6 a -0,2 (côncavo/retilíneo); -0,2 a 0,2 (retilíneo); 0,2 a 0,6 (convexo/retilíneo); e 0,6 a 1 (convexo/convexo). Foram extraídas da imagem de curvaturas as áreas com cada um dos intervalos de valores estabelecidos.

Após a definição das áreas com os intervalos, foram adotadas técnicas de classificação espectral geralmente utilizadas em dados de sensoriamento remoto, adaptadas para a classificação de assinaturas geomorfométricas, conforme Vasconcelos et al., (2012). O procedimento utilizado passou por três etapas: (i) redução da quantidade de informações espectrais pelo algoritmo *Minimum Noise Fraction* (MNF) que separa a fração sinal do ruído; (ii) redução da quantidade de informação espacial selecionando os pixels mais puros pelo Índice de Pureza do Pixel (PPI - sigla em inglês); (iii) seleção das assinaturas em um visualizador n-dimensional. As assinaturas geomorfométricas selecionadas foram inseridas no classificador espectral *Spectral Angle Mapper* (SAM).

Para avaliar a relação das formas do terreno com a paisagem, foi utilizada uma imagem do sensor Landsat 8. As formas mapeadas foram simplificadas e sobrepostas com a imagem em uma área natural dentro da bacia a fim de evidenciar as possíveis relações com os elementos da paisagem. Foi elaborada uma composição colorida em cor verdadeira com as bandas do Landsat 8 (R - Banda 4; G - Banda 3; B - Banda 2). Essa composição colorida foi elaborada para facilitar a interpretação das relações existentes.

4. Resultados e Discussão

4.1. Resultados das assinaturas geomorfométricas e formas do terreno

Foram identificadas trinta assinaturas geomorfométricas, cada uma delas representando uma forma do terreno distinta com potencial para apresentar diferentes atributos de solo e vegetação. Com o objetivo de avaliar o contexto regional e dividir o terreno na quantidade de formas compatíveis com as propostas por Wood (1996), as assinaturas foram reduzidas em seis, das quais cada uma corresponde a uma forma específica do terreno. São elas: Convexo/Convexo (Cx/Cx); Convexo/Retilíneo (Cx/Rt);

Convexo/Côncavo (Cx/Cc); Retilíneo/Retilíneo (Rt); Côncavo/Retilíneo (Cc/Rt); e Côncavo/Côncavo (Cc/Cc) (Figura 3). Os valores das curvaturas foram considerados dentro dos intervalos pré-estabelecidos (Tabela 1).

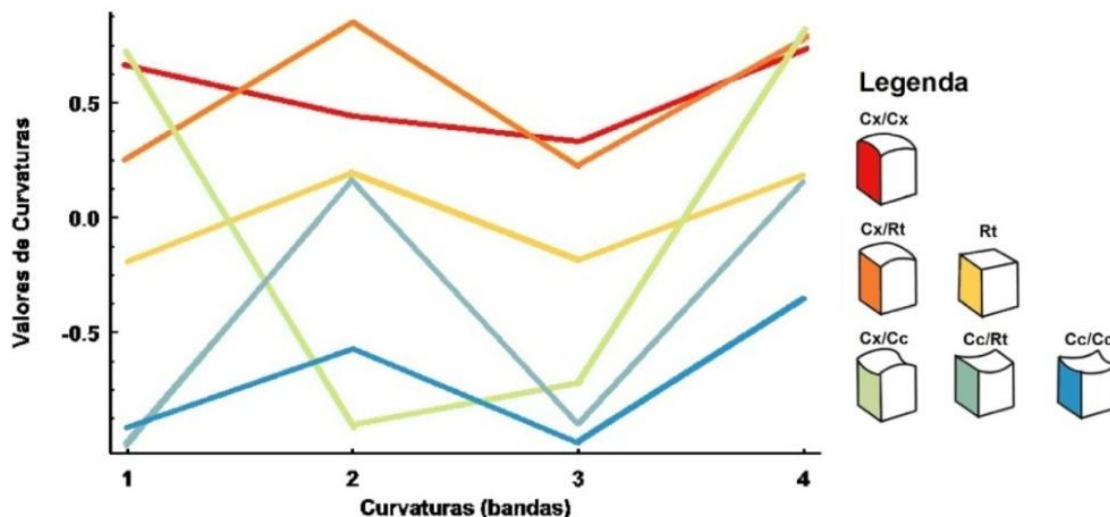


Figura 3. Assinaturas Geomorfométricas selecionadas para a classificação das Formas do Terreno da BARP. As curvaturas seguem a seguinte ordem: Banda 1 - Curvatura Longitudinal; Banda 2 - Curvatura Transversal; Banda 3 - Mínima Curvatura; Banda 4 - Máxima Curvatura.

Tabela 1. Valores extraídos das curvaturas normalizadas que representam as assinaturas geomorfométricas utilizadas. Os intervalos pré-estabelecidos foram considerados.

Classes	Curvaturas com valores normalizados			
	Longitudinal	Transversal	Mínima	Máxima
<i>Cx/Rt</i>	0,665	0,442	0,332	0,733
<i>Cx/Cx</i>	0,199	0,849	0,197	0,782
<i>Rt</i>	-0,189	0,192	-0,182	0,187
<i>Cx/Cc</i>	0,712	-0,904	-0,721	0,809
<i>Cc/Rt</i>	-0,978	0,165	-0,899	0,156
<i>Cc/Cc</i>	-0,914	-0,570	-0,980	-0,349

Esse método permitiu identificar as seis principais formas do terreno presentes na bacia. As formas estão representadas cartograficamente na Figura 4. As formas Cx/Rt e Cc/Cc são as mais representativas na BARP (19,84% e 19,71%, respectivamente). Por outro lado, a forma Rt ocupa a menor extensão (11,01%), indicando que o relevo da bacia tem um padrão suave-ondulado com poucas áreas planas. As maiores altitudes e menores médias de declividade estão nas formas Cx/Rt e Cx/Cx (799-1190m) por estarem localizadas nos interflúvios, ao contrário de Cc/Rt (786-1153m) que seguem os padrões de drenagem. A forma Cx/Cc apresenta a maior amplitude (401m) por estar relacionado com interflúvios e canais ao mesmo tempo. As formas Cc/Cc e Cc/Rt têm as maiores médias de declividade, sugerindo um leve aprofundamento e indicando a influência da drenagem na dissecação da área (Tabela 2).

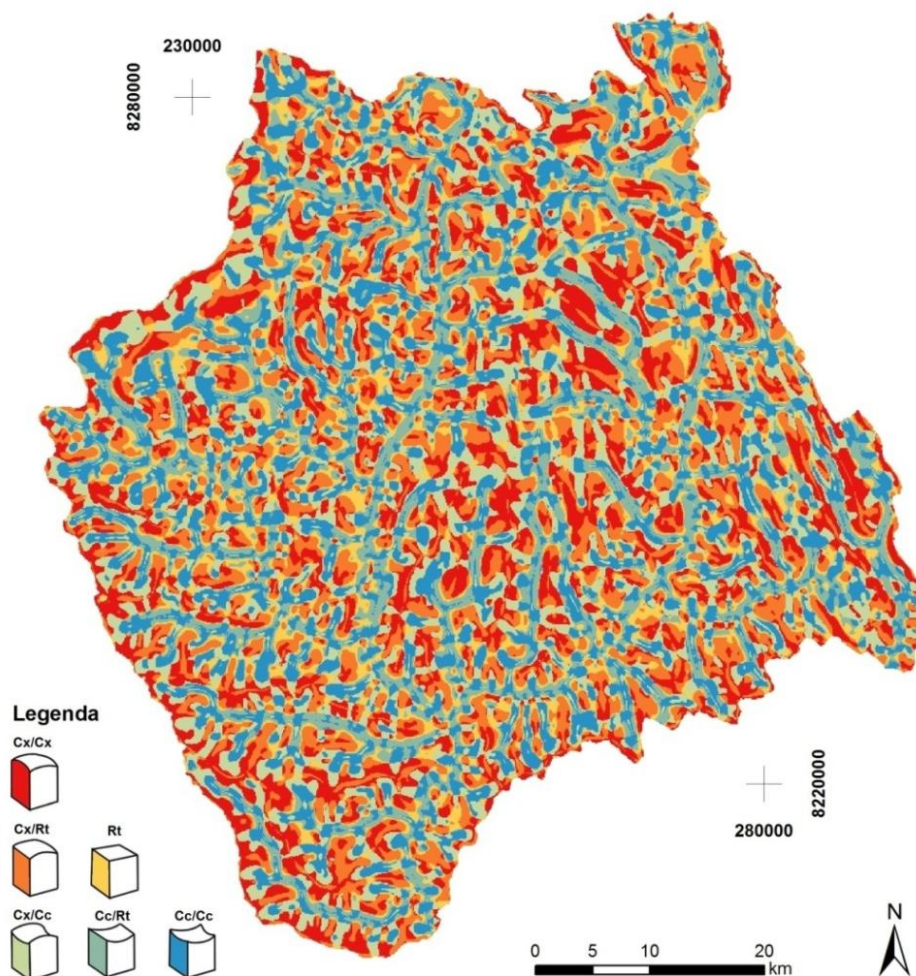


Figura 4. Formas do Terreno classificadas por meio de Assinaturas Geomorfométricas de curvaturas de perfil com abertura de janela de 15x15.

Tabela 2. Estatística descritiva das classes mapeadas.

Classes	Área (%)	Altimetria (metros)				Declividade(°)			
		Mín	Máx	Média	Desvio Padrão	Mín	Máx	Média	Desvio Padrão
Cx/Rt	19,84	799	1190	941,52	50,34	0	18,84	2,34	1,54
Cx/Cx	18,82	805	1190	959,43	58,02	0	21,18	2,3	1,75
Rt	11,01	786	1172	922,57	48,51	0	18,68	2,42	1,51
Cx/Cc	16,83	785	1186	944,67	57,05	0	21,16	2,42	1,65
Cc/Rt	13,8	786	1153	905,63	43,98	0	22,19	2,48	1,54
Cc/Cc	19,71	784	1157	916,95	46,58	0	22,25	2,54	1,52

4.2. Discussão sobre o mapeamento geomorfológico aplicado aos estudos de paisagens

As classes de forma do terreno com padrões côncavos estão seguindo as drenagens da bacia, mostrando a influência da dissecação fluvial no relevo local. As formas convexas aparecem principalmente nos interflúvios. Neste contexto, o método pode ser aplicado para realizar levantamentos prévios sobre áreas de erosão e deposição, sobre o comportamento da água na superfície (escoamento ou acumulação), e sobre a variabilidade espacial de solos.

Neste contexto, o resultado da segmentação das formas do terreno respondeu à lógica de organização da paisagem. Em diversos estudos, as formas do terreno se mostraram

eficientes para mapear a variabilidade de atributos do solo (Sanchez et al., 2009). Gryze et al., (2008) mediram as relações das formas de terreno com os estoques de nutrientes em solos agrícolas. Os autores concluíram que nas zonas convexas, predominantemente erosivas, os valores de nutrientes decrescem ao longo do tempo, enquanto nas áreas côncavas esses valores se mantêm estáveis independente do tratamento agrícola.

O acúmulo de água e nutrientes relacionado ao padrão de deposição em formas côncavas tende a proporcionar o aumento da produtividade primária em comparação com áreas convexas. Os resultados confirmam essa afirmação, evidenciando uma relação entre os padrões da vegetação com as formas de terreno mapeadas. A Figura 5 ilustra um recorte dentro de uma área preservada da bacia onde é possível observar essa relação. As formações florestais seguem os padrões côncavos identificados, indicando uma maior produtividade nessas áreas (Figura 5).

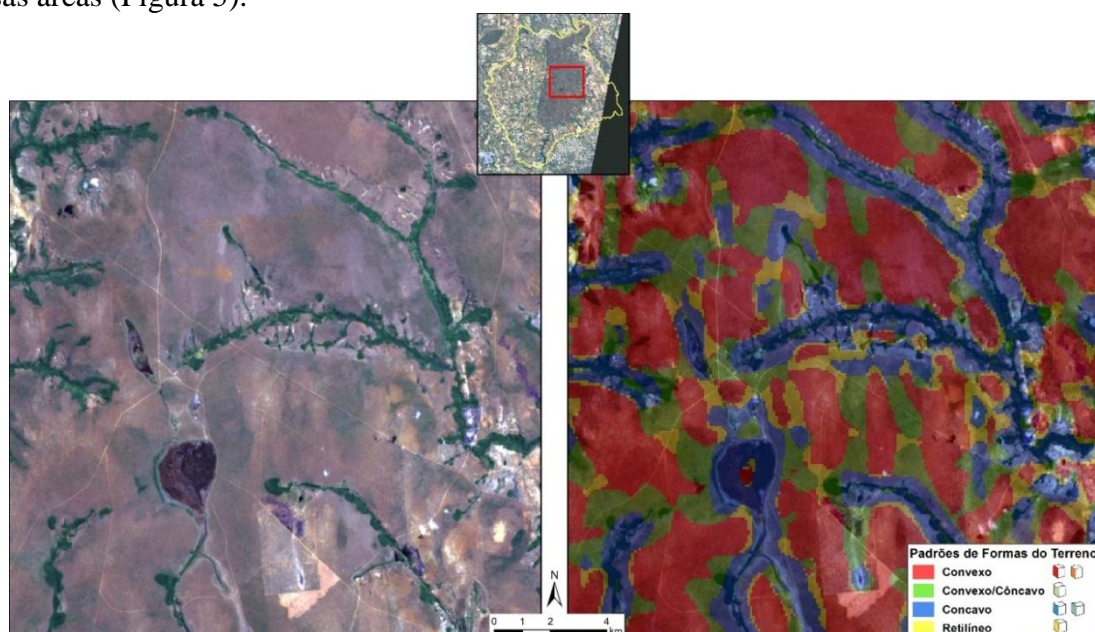


Figura 5. Vegetação representada por uma composição de cor verdadeira com bandas do Landsat 8 (esquerda) dentro de uma área natural da bacia e sobreposição das formas do terreno com transparência (direita). As formas Cx/Rt e Cx/Cx estão unidas na forma de terreno convexo. Cc/Rt e Cc/Cc estão representadas na forma de terreno côncavo. O relevo côncavo segue a continuidade dos cursos d'água e das matas de galeria associados a eles.

5. Conclusão

A aplicação de técnicas de sensoriamento remoto na análise de dados morfométricos possibilitou a delimitação automática de formas do terreno. A classificação espectral de assinaturas geomorfométricas é um avanço para o mapeamento das formas do terreno, pois admite uma flexibilidade na escolha das assinaturas. Com isso, é possível analisar com mais detalhe a complexidade das formas e dos elementos do relevo.

A utilização dessa técnica permitiu um mapeamento simplificado das seis principais formas do terreno, derivadas da combinação das três formas elementares (côncavo, convexo e retilíneo): Convexo/Convexo (18,82%); Convexo/Retilíneo (19,84%); Convexo/Côncavo (16,83%); Retilíneo/Retilíneo (11,01%); Côncavo/Retilíneo (13,8%); e Côncavo/Côncavo (19,71). Essa abordagem auxilia o entendimento da paisagem regional. Neste sentido, o mapeamento evidenciou o padrão suave-ondulado com aumento da declividade próximo às drenagens da bacia. Além disso, mostrou que a vegetação da área pode responder diretamente às formas do terreno, indicando a influência das formas na produtividade da paisagem.

Trabalhos futuros são necessários para mostrar as possibilidades do uso de classificação espectral de assinaturas geomorfométricas na análise do terreno. Outros

trabalhos devem medir e descrever a natureza da relação das formas do terreno com a vegetação em escala regional, a fim de aprimorar o entendimento sobre o funcionamento da paisagem e auxiliar o planejamento ambiental.

Referências Bibliográficas

- Almeida, F.F.M. O Cráton do São Francisco. **Revista Brasileira de Geociências**, v.7, n. 4, p. 349-364. 1977.
- 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
- 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.
- Gryze, S.D.; Six, J.; 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, p.180-188, 2008.
- 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.
- 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.
- 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.
- 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 landslideterrain types from digital elevation models. **Mathematical Geology**, v. 20, 491–511. 1988.
- 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.
- 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.
- 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.
- Smith, B.; Sandwell, D. Accuracy and resolution of Shuttle Radar Topography Mission data. **Geophysical Research Letters**, v. 30, n. 9, 1467, 2003.
- 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, (Abr-Jun) p.171-186, 2012.
- Wood, J. **The Geomorphological Characterization of Digital Elevation Models**. Ph.D. Thesis, Department of Geography, University of Leicester, UK, 1996.