



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Classificação automatizada do relevo utilizando a ferramenta Geomorphons: estudo de caso para o município de Campo Grande – MS

Antonio Edduardo de Souza Amorim¹, Viviane Capoane²

¹ Graduando em Geografia, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Unidade Universitária Campo Grande, Av. Dom Antônio Barbosa (MS-080), 4.155, CEP 79115-898, Campo Grande – MS; ² Drª. em Geografia, Professora Adjunta, Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Unidade Universitária Campo Grande, Av. Dom Antônio Barbosa (MS-080), 4.155, CEP 79115-898, Campo Grande – MS. capoane@gmail.com (autora correspondente).

Artigo recebido em 05/08/2021 e aceito em 06/03/2022

RESUMO

A topografia da superfície terrestre é resultante de duas forças antagônicas, as endógenas e as exógenas. A atuação dessas duas forças resulta em uma grande variedade de formas de relevo com características distintas, por isso, a importância da classificação e mapeamento da morfologia de uma paisagem. Uma das abordagens é a ferramenta Geomorphons, que tem como produto a estratificação da paisagem em 10 elementos únicos, mas reconhecíveis: cume, crista, ombro, espora, encosta, concavidade, sopé, vale, depressão e plano. No presente trabalho foi investigado o efeito da resolução espacial de Modelos Digitais de Superfície (MDSs) e de Elevação (MDE) na classificação automatizada do relevo do município de Campo Grande, Mato Grosso do Sul, utilizando a ferramenta Geomorphons. Os Geomorphons foram derivados automaticamente dos MDSs e MDE, de diferentes fontes (radar e aerolevantamento) e resoluções (5, 12,5, 30, 90 m), no programa SAGAGIS. Os resultados obtidos mostram que a classificação automatizada das formas de relevo é sensível a escala de mapeamento e a resolução espacial dos MDSs e MDE. Em resoluções espaciais menores (12,5, 30, 90 m), as características do terreno são generalizadas, suavizadas ou não detectadas, o que limita a capacidade preditiva e acurácia dos fenótipos do relevo derivados. A base de maior resolução espacial (MDE 5 m) representou de forma mais realista a heterogeneidade do relevo do município de Campo Grande.

Palavras-chave: Fenótipos de relevo; Mapeamento do relevo; Resolução espacial de MDS e MDE; Escala.

Automated relief classification using the Geomorphons tool: a case study of Campo Grande municipality – MS

ABSTRACT

The topography of the Earth's surface is the result of two antagonistic forces, endogenous and exogenous. The acting of these two forces results in a wide variety of landforms, with different characteristics, therefore, the importance of classifying and mapping the landscape morphology. One of the approaches is the Geomorphons tool which results in the stratification of the landscape in 10 unique elements, but recognizable: ridge, summit, shoulder, spur, slope, hollow, footslope, valley, depression and flat. In the present work, the effect of the spatial resolution of the Digital Surface Models (DSMs) and Digital Elevation Models (DEMs) in the automated relief classification of the municipality of Campo Grande, Mato Grosso do Sul, using the Geomorphons tool. Geomorphons were automatically derived from DSM and DEM, of different sources (radar and aerial survey) and resolutions (5, 12.5, 30, 90 m), in the SAGAGIS software. The results obtained show that automated landforms classification is sensitive to the mapping scale and spatial resolution of the DSMs and DEM. In smaller spatial resolutions (12.5, 30, 90 m), terrain features are generalized, smoothed, or not detected, limiting the predictive capacity and accuracy of the derived relief phenotypes. The base with the highest spatial resolution (DEM 5 m) represented more realistically relief heterogeneity of Campo Grande municipality.

Keywords: Geomorphological phenotypes, Landform mapping, Spatial resolution DSM and DEM, Scale.

Introdução

A topografia da superfície terrestre é resultante de duas forças antagônicas que tem agido concomitantemente desde a formação do

planeta, sendo elas as endógenas e as exógenas. Os processos endógenos, amplamente controlados pela tectônica de placas, criam a topografia por meio de movimentos verticais diferenciais

(soerguimento, subsidência) e a construção de edifícios vulcânicos, estruturando o relevo; os processos exógenos, impulsionados pela energia solar e governados pela gravidade, tendem a erodir as terras altas e acumular sedimentos em terras baixas e em áreas em subsidência, ou seja, atuam na destruição do relevo (Grotzinger e Jordan, 2013; Marques, 2015; Gutiérrez e Gutiérrez, 2016; Gutiérrez e Soldati, 2018). A atuação dessas duas forças resulta em uma grande variedade de formas de relevo, com características distintas (Mokarram e Sathyamoorthy, 2018), por isso, a importância da classificação dos acidentes geográficos.

Uma das origens da modelagem do relevo é atribuída ao trabalho de Milne (1935), no que é chamado de modelagem solo-paisagem - Catena. Este pesquisador da área de Ciência do Solo teria sido o primeiro a reconhecer as associações complexas solo-paisagem, notando que em áreas extensas com variabilidade topográfica regular ou rítmica, os solos também tinham padrões repetíveis em encostas homogêneas (em termos de condições climáticas e estrutura geológica), e que esses padrões deveriam ser interpretados como indicação de ocorrência não de um único tipo de solo, mas de uma sequência de tipos de solos. Jenny (1941) também mostrou que o contexto geomorfológico (topografia, natureza do material parental e a idade relativa - morfoestratigrafia) fornece uma estrutura genética que contribui para a compreensão dos processos de formação do solo, consequentemente, para sua classificação e mapeamento.

Com base no trabalho de Geoffrey Milne, em 1956, Ruhe desenvolveu um modelo solo-superfície geomórfica integrando as características do solo com os modelos de evolução das vertentes. Ruhe estudou a vertente subdividindo-a em três unidades: cume, ombro e encosta. Em 1968, Ruhe e Walker definiram as cinco principais posições no perfil de uma vertente: cume, porção convexa do ombro, inclinação mais ou menos uniforme da encosta, e a porção côncava da base da encosta, que foi subdividida em inclinação superior do sopé e posição inferior do sopé. Mais tarde, o modelo de Ruhe e Walker (1968) tornou-se padrão para a descrição, segmentação e classificação do relevo.

Até a década de 1950, em função das limitações tecnológicas (computadores, processadores, etc.), as formas de relevo eram descritas de forma qualitativa, baseadas na interpretação visual de fotografias aéreas estéreo e mapas topográficos, apoiados por levantamentos de campo (Horton, 1945; Strahler, 1957). A interpretação visual, a extração de formas de relevo e a medição de parâmetros de mapas topográficos,

eram trabalhosas e demoradas. Além disso, as classes de formas de relevo modeladas eram subjetivas, pois conforme Mckenzie (2000), dependiam fortemente da experiência do modelador e do modelo conceitual, que é materializado implicitamente em mapas. Com o advento do Sistema de Informação Geográfica (SIG), sensores remotos e proximais, e a disponibilidade crescente de Modelos Digitais de Superfície (MDSs) e Modelos Digitais de Elevação (MDEs), foi possível o desenvolvimento de inúmeros métodos de classificação automatizada do relevo tendo como base o modelo solo-superfície geomórfica.

A maior parte dos métodos de classificação automatizada desenvolvidos pós advento dos SIGs e disponibilização gratuita de MDSs e MDEs concentraram-se na curvatura do perfil, declive e rugosidade da superfície (Troeh, 1965; Dalrymple; Blong; Conacher, 1968; Huggett, 1975; Conacher e Dalrymple 1977; Pennock; Zebarth; De Jong, 1987; Dikau et al., 1995; Schmidt e Hewitt 2004; Park e Van De Giesen, 2004; Drăguț e Blaschke, 2006; Iwahashi e Pike, 2007, dentre inúmeros outros), o que para Stepinski e Jasiewicz (2011) e Jasiewicz e Stepinski (2013), gera elementos de relevo que geralmente não são compatíveis com as posições da Catena de Milne. Isso levou estes autores a proporem um método de classificação do relevo a partir dos Geomorphons.

Os Geomorphons representam as microestruturas fundamentais em uma paisagem (fenótipos geomorfológicos) (Julesz, 1981) e, simultaneamente, os atributos do terreno e os tipos de relevo (Stepinski e Jasiewicz, 2011; Jasiewicz e Stepinski, 2013). O produto do algoritmo Geomorphons é a estratificação da paisagem em 10 elementos únicos, mas reconhecíveis: cume, crista, ombro, espora, encosta, concavidade, sopé, vale, depressão e plano. Este algoritmo discretiza o relevo baseado no padrão topográfico completo correspondente a elementos específicos do relevo, não apenas em variáveis geomorfométricas (Silva et al., 2016). Para Yokoyama et al. (2002), esta capacidade de determinar um padrão local a partir de MDSs e MDEs usando uma abordagem de vizinhança com tamanho e forma que se adapta à topografia local com base no princípio da linha de visão, permite uma melhor correspondência dos elementos do relevo, desde que a escala de mapeamento seja apropriada.

No Brasil, desde a proposição do método Geomorphons, vários autores aplicaram a ferramenta: para a classificação automatizada do relevo nos estados do Rio Grande do Sul (Robaina;

Trentin e Laurent, 2016), Tocantins (Robaina et al., 2017) e Paraná (Silveira et al., 2018); para a classificação automatizada de elementos do relevo em bacias hidrográficas (Furlan, Trentin e Robaina, 2018; Rademann e Trentin, 2018; Guadagnin e Trentin, 2019; Dutra, Furlan e Robaina, 2020); e compartimentação do relevo no âmbito municipal (Dotto e Robaina, 2021). A ferramenta também já foi utilizada como apoio no mapeamento digital de solos (Pinheiro et al., 2015; Silva et al., 2016ab).

Considerando que a capacidade de representar a complexidade topográfica é controlada pela escala de mapeamento e resolução espacial (tamanho do pixel) de Modelos Digitais de Superfície e Elevação (Zhang e Montgomery, 1994; Kienzie, 2004; Wechsler e Kroll, 2006; Wechsler, 2006; Wechsler, 2007; Reuter, et al., 2009; Capoane, 2020; Atkinson; Clercq; Rozanov, 2020, dentre inúmeros outros), este trabalho teve como objetivo investigar o efeito da fonte (radar e aerolevantamento) e resolução espacial de MDSs e

MDE na classificação automatizada do relevo com a ferramenta Geomorphons. A área geográfica selecionada para a investigação foi o município de Campo Grande, Mato Grosso do Sul.

Material e métodos

Localização e Caracterização da Área de Estudo

O município de Campo Grande localiza-se na porção central do estado de Mato Grosso do Sul (MS) (Figura 1), com uma área de 8.092,95 km², o que corresponde 2,26% do estado de MS. De acordo com dados do último Censo Demográfico (IBGE, 2010) a população do município era de 786.797 habitantes, com 98,7% residindo na zona urbana. Para 2020, a estimativa do IBGE foi de 906.092 habitantes. Na economia destacam-se o setor de Comércio e Serviços, seguido pelo setor Industrial e o Agropecuário (Planurb, 2017).

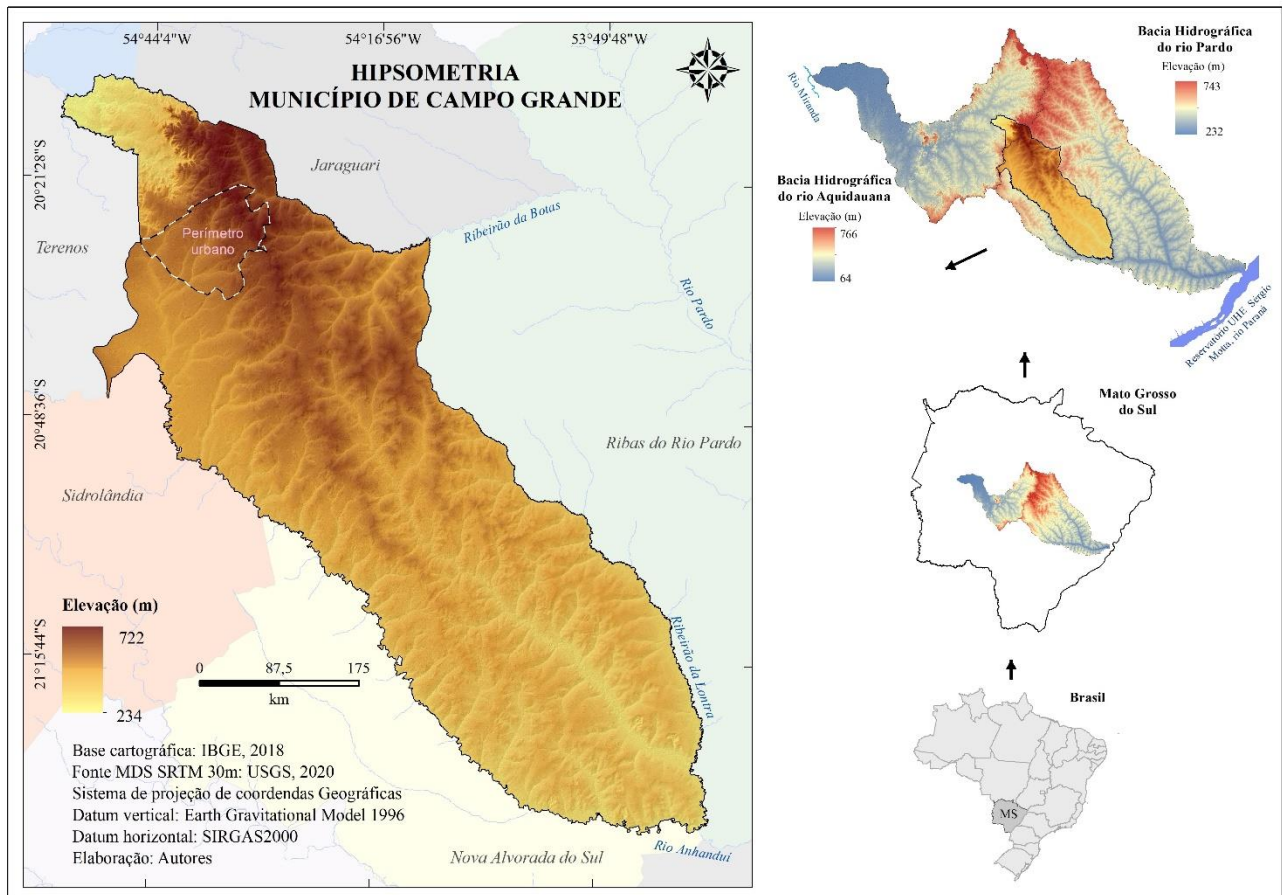


Figura 1. Contexto geográfico da área de estudo, município de Campo Grande.

O clima do município de Campo Grande, segundo a classificação de Köppen, situa-se na faixa de transição entre o sub-tipo Cfa – mesotérmico úmido sem estiagem – em que a temperatura do mês mais quente é superior a 22°C,

e o sub-tipo Aw – tropical úmido com estação chuvosa no verão e seca no inverno (MOTTA, et al., 2013). A precipitação acumulada para o ano de 2021 foi de 1.348,6 mm sendo janeiro o mês mais chuvoso (387,2 mm) (Cemtec, 2022).

No contexto Geológico (Figura 2), o município encontra-se na porção ocidental da bacia sedimentar do Paraná, estando presentes a Formação Botucatu (arenitos eólicos) e os derrames basálticos da Formação Serra Geral (supersequência Gondwana III - Neojurássico-Eocretáceo); a Bacia sedimentar de Bauru, Grupo Caiuá (indiviso), uma bacia intracratônica de subsidência isostática Neocretácea; coberturas coluvionares, possivelmente Terciárias e depósitos aluvionares Quaternários (Millani et al., 1998;

Lacerda-Filho et al., 2006; Basilici; Sgarbi; Dal'bó, 2014).

No contexto geomorfológico, o município encontra-se na macroforma de relevo dos Planaltos e Chapadas da Bacia do Paraná (Ross et al., 2019), e as Unidades Geomorfológicas presentes são (Figura 2): Planalto Sul-Mato-Grossense, Planalto de Campo Grande, Planalto dissecado da borda ocidental da bacia do Paraná e Planícies e Terraços fluviais (IBGE, 2018).

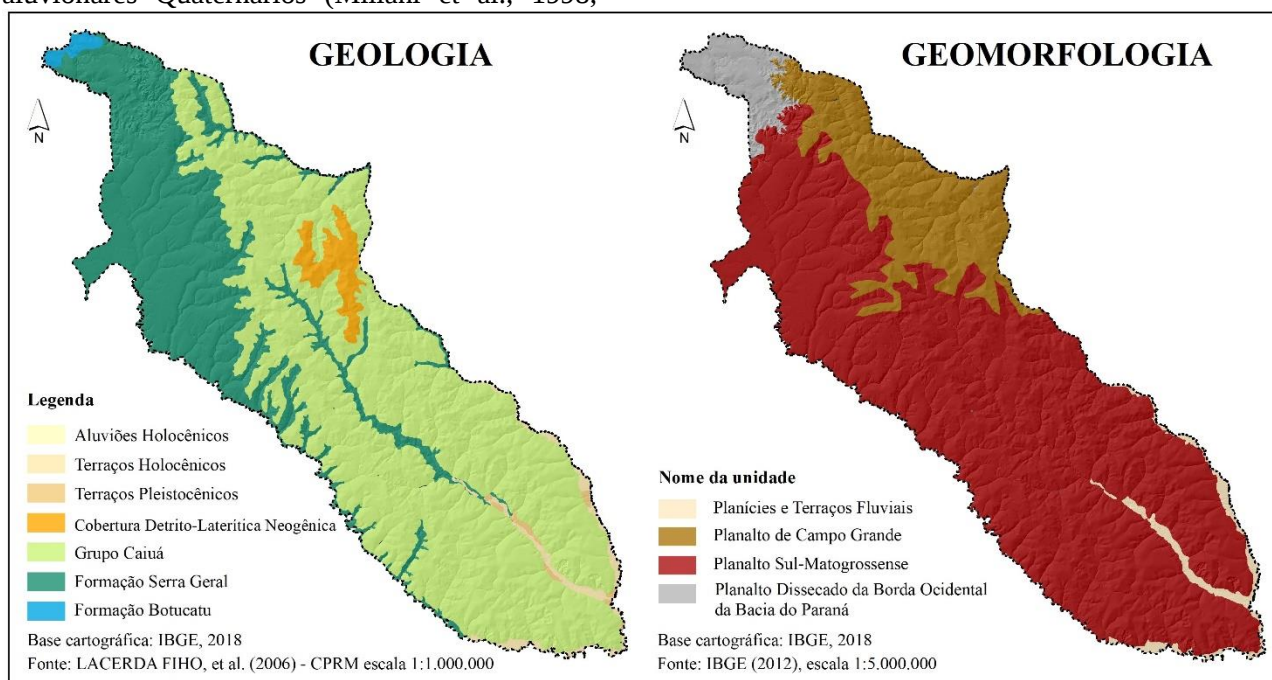


Figura 2. Litologia e Unidades de relevo no município de Campo Grande. Organização: Capoane, V.

As classes de solo mapeadas em Levantamento de Reconhecimento de Baixa Intensidade na escala 1:100.000 (Motta et al., 2013) são: Neossolo Quartzarênico (45,61%), associado aos arenitos do Grupo Caiuá, Latossolo Vermelho (41,77%), Latossolo Vermelho-Amarelo (3,29%) e Latossolo Amarelo (1,65%), associados principalmente a Formação Serra Geral, e no médio e baixo curso das bacias hidrográficas dos rios Anhanduí e Anhanduizinho; Neossolo Litólico (0,94%) em relevo forte ondulado, montanhoso e escarpado da borda dissecada da bacia sedimentar do Paraná; Planossolo Háplico (1,89%) associados as terraços e planícies fluviais do baixo curso dos rios Anhanduizinho, Lontra e Anhanduí; e Gleissolo Háplico (0,93%) em áreas de fundo de vale e áreas úmidas de cabeceira de drenagem.

No contexto hidrográfico (Figura 1B), 92,9% da área do município compõe a Bacia Hidrográfica do Rio Paraná, sendo os principais rios o Anhanduí, Anhanduizinho, Ribeirão da Lontra e Ribeirão das Botas. Estes rios são

afluentes do rio Pardo, que por sua vez é afluente do rio Paraná. Uma pequena parte (7,1%), no noroeste do município, está inserida na bacia hidrográfica do córrego Ceroula, sub-bacia do rio Aquidauana, que por sua vez é afluente do rio Miranda (Figura 1B), afluente do Rio Paraguai.

A vegetação natural do município compõe, predominantemente, a ecorregião do Cerrado (94%) e, 6% da área do município corresponde ao bioma Mata Atlântica (SOS Mata Atlântica/INPE, 2020).

Base Cartográfica e Modelos Digitais de Superfície e de Elevação

O recorte espacial (limite municipal) utilizado no presente trabalho foi obtido no repositório do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2018). Uma vez que, a escala da malha municipal do IBGE não permite o delineamento correto dos divisores naturais (rios) e que isso afetaria a quantificação das classes de relevo a serem derivadas, principalmente, os vales,

foi necessário o ajuste das linhas de divisa natural. Para o ajuste em ambiente do SIG foram utilizadas imagens de alta resolução espacial do *World Imagery* e as curvas de nível de um aerolevantamento do município de Campo Grande do ano de 2008 na escala 1:10.000 (Semadur, 2020).

Para a classificação automatizada do relevo do município foram utilizados dados de elevação obtidos via sensoriamento orbital (MDSs) e terrestre (MDE). Os Modelos Digitais de Superfície correspondem a modelos altimétricos da forma da superfície incluindo vegetação, infraestruturas, etc. Os Modelos Digitais de Elevação, assim como os Modelos Digitais do Terreno, são modelos altimétricos da forma da superfície terra nua. Os MDSs e as informações utilizadas para geração do MDE estão disponíveis de forma gratuita.

Os MDSs obtidos via sensoriamento orbital utilizados foram: SRTM 90 m, Topodata 30 m, SRTM 30 m, Aster G-DEM 30 m e Alos Palsar 12,5 m. Os dados da *Shuttle Radar Topography Mission* processados pela NASA, embora obtidos com resolução de grade de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 m no equador), foram disponibilizados inicialmente com esta resolução somente para os Estados Unidos. Os dados disponibilizados para os demais países foram degradados para uma resolução espacial de 3 segundos de arco (aproximadamente 90 m no equador). A cena SRTM 90 m que cobre a área de estudo foi obtida no repositório do *Consortium for Spatial Information* (CSI, 2020).

Em função da disponibilização inicial da versão degradada do MDS SRTM, pesquisadores do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) desenvolveram o projeto Topodata (Valeriano e Rosseti, 2010), que consiste em uma reamostragem (por krigagem) do SRTM 90 m (produto da reamostragem do SRTM 30 m), para uma resolução espacial de 30 m. As quatro cenas do projeto Topodata que cobrem o município de Campo Grande foram obtidas na Divisão de Sensoriamento Remoto do INPE (DSR, 2020).

Em novembro de 2014 o EROS Data Center do *United States Geological Survey* (USGS) passou a disponibilizar as cenas SRTM, versão 3.0, com resolução espacial de 1 segundo de arco para África, Europa, América do Norte e América do Sul. As quatro cenas que cobrem a área de estudo foram obtidas no *Earth Explorer* (USGS, 2020).

O *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), a bordo da espaçonave Terra da NASA lançada em

dezembro de 1999, é um esforço cooperativo entre a NASA, *Japan's Ministry of Economy, Trade and Industry* e *Japan Space Systems* para criar mapas detalhados de altitude. O Aster Global-DEM, versão 3, foi gerado usando 1.880.306 cenas de Nível 1A adquiridas entre 1 de março de 2000 e 30 de novembro de 2013 (Abrams e Crippen, 2019). As quatro cenas ASTER G-DEM, v.3, que cobrem a área de estudo foram obtidas no *Japan Space Systems* (JSS, 2020).

O *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS), foi lançado pela *Japan Aerospace Exploration Agency* em 24 de janeiro de 2006. O *Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR) corresponde a um radar imageador de abertura sintética que opera com resoluções espaciais que variam entre 10 e 100 m e possui três modos de imageamento: fino, ScanSAR e polarimétrico (Igarashi, 2001). As oito cenas que cobrem o município de Campo Grande, no modo de imageamento *fine beam single* (FBS): banda L, polarização HH e resolução de pixel de 12,5 m, com data de aquisição de 03/05/2011, foram obtidas no repositório da *Alaska Satellite Facility* (ASF, 2020).

Conforme Hirt (2018), modelos altimétricos estão sujeitos a imperfeições, como erros verticais e horizontais, ruído de manchas, vazios (áreas não observadas, também denotadas como buracos) e enviesamentos (deslocamentos), que podem variar regionalmente. Segundo este autor, características artificiais (artefatos) que representam incorretamente a superfície real do terreno como picos, buracos, defeitos de pixel, também podem ser encontrados nesses modelos. Dentre estas imperfeições, os artefatos podem ser a fonte de erro mais problemática, pois influenciam nos parâmetros derivados. Embora vários esforços de pós-processamento tenham sido realizados por agências espaciais e instituições de pesquisa a fim de diminuir os erros (desvio de uma medição de seu valor real – Wechsler, 2003), os dados de elevação globais contemporâneos não estão livres de artefatos (Lecours et al., 2017; Hirt, 2018). Por isso, neste trabalho foram utilizados os MDSs originais (SRTM 90 m v.4.1, Topodata, SRTM 30 m v.3, Aster G-DEM v.3 e Alos Palsar), ou seja, nenhum filtro foi aplicado para remover “dados espúrios”.

As depressões no terreno, frequentemente tratadas como espúrias e eliminadas utilizando o módulo *fill* em programas de geoprocessamento, não foi utilizada, pois o preenchimento de depressões em MDEs e MDSs altera significativamente a distribuição espacial e a

quantificação de atributos do terreno derivados (Antonic; Dalibor; Renata, 2000; Lindsay e Creed, 2005; Wechsler, 2007; Pike et al., 2009; Lecours et al., 2017).

O Modelo Digital de Elevação utilizado no presente trabalho foi gerado (interpolação) com dados de elevação obtidos pela técnica de fotogrametria na escala 1:10.000 na zona rural (voo março de 2008, faixa 03, fotos 940 a 942) e 1:2.000 na zona urbana (voo fevereiro de 2008, faixa 12, fotos 8.424). Os dados são disponibilizados pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Desenvolvimento Urbano (Semadur, 2020). Na zona urbana a equidistância das curvas é de um metro e, na zona rural, cinco metros. A camada de pontos cotados contém 79.631 pontos no perímetro urbano e 17.346 pontos na zona rural. Os pontos cotados do aerolevantamento de 2008 foram reambulados no ano de 2013, quando da realização de um novo aerolevantamento para o perímetro urbano de Campo Grande na escala 1:1.000 (Diogrande, 2013).

No programa ArcMap 10.8.1 (licenciado para a segunda autora) as curvas de nível e pontos cotados do aerolevantamento foram interpolados utilizando o método *topo to raster*. Este método de interpolação, segundo Hutchinson (1989) e Hutchinson; Xu; Stein (2011), resulta em melhor consistência hidrológica criando uma superfície que representa mais de perto uma drenagem natural e preserva melhor as linhas de cume. Para a definição da resolução espacial foi considerado a equidistância das curvas de nível (cinco metros para a zona rural).

Uma vez gerado o MDE, foram realizados testes preliminares a fim de detectar a presença de artefatos. Como os artefatos são “recursos erráticos distintos, a maioria deles pode ser detectada visualmente em vistas tridimensionais, usando sombreado” (Reuter, et al., 2009, p. 91), foi gerado o relevo sombreado, o que possibilitou a identificação de inúmeros buracos, picos, e curvas de nível com cota errada. As curvas de nível foram corrigidas, pois é um processo simples, uma vez que a cota da curva posterior e anterior são conhecidas. Já para os pontos cotados (cotas 0, negativas, superiores ou inferiores entre às curvas de nível), optou-se pela sua exclusão. Após a correção das cotas das curvas e eliminação de pontos cotados, procedeu-se uma nova interpolação, gerou-se o relevo sombreado e, quando não foram mais detectados artefatos, procedeu-se a etapa seguinte.

Em testes preliminares também se observou o efeito do ruído da microtopografia –

inerente em MDEs de alta resolução espacial (Atkinson; Clercq; Rozanov, 2020) - nos fenótipos de relevo derivados para o perímetro urbano. O ruído resulta da escala de detalhe do mapeamento (1:2.000), com equidistância das curvas de nível de um metro, e concentração de pontos cotados, ou seja, em MDEs gerados com dados de grande escala, os atributos do terreno contêm um excesso de detalhes que geram ruído (Cavazzi et al., 2013). Por isso, foi realizada uma nova interpolação, e para o perímetro urbano foram utilizadas somente as curvas de nível mestras, de cinco em cinco metros.

Os MDSs e MDE foram extraídos usando como máscara o limite municipal (corrigido) e convertidos para o formato compatível para carregamento no SAGA GIS para a etapa seguinte, classificação automatizada do relevo.

Classificação Automatizada do Relevo

No programa SAGA GIS, versão, 7.7.0., utilizando o módulo *Terrain Analyses* → *Lighting, Visibility* → *Geomorphons*, procedeu-se a classificação automatizada do relevo. Este módulo do SAGA GIS delinea as 10 unidades de relevo mais universalmente aceitas, aplicando um algoritmo de reconhecimento de padrão que se baseia em um raio de busca de vizinhança local a partir de um ponto focal central (Stepinski e Jasiewicz, 2011; Jasiewicz e Stepinski, 2013).

Apresentação dos Resultados

Os 10 fenótipos de relevo derivados dos MDSs e MDE foram quantificados (área %) e submetidos a uma análise de variância (coeficiente de determinação R^2). Os resultados são apresentados na forma de cartas temáticas (análise qualitativa ou visual) e gráfico (análise quantitativa).

Resultados e discussão

A análise qualitativa dos fenótipos de relevo do município de Campo Grande evidencia a generalização e a perda de detalhes morfológicos da superfície do terreno à medida que a resolução espacial diminui (Figura 3)

Os Geomorphons derivados do MDS Aster GDEM não representaram satisfatoriamente os fenótipos de relevo presentes no município. Isso é consequência da maior quantidade de artefatos e variações superficiais que são consideradas e quantificadas como valores de elevação no Aster GDEM, principalmente para as áreas planas. Para Atkinson, Clercq, Rozanov (2020), a principal

desvantagem do ASTER para análise de paisagem é que, como um sensor óptico, a coleta de dados pode ser prejudicada pela cobertura de nuvens em determinadas áreas, levando a anomalias de dados, como vazios (buracos) ou artefatos.

Em trabalho desenvolvido por Hirt; Filmer e Featherstone (2010), os autores investigaram a qualidade, em termos de precisão de elevação e erros sistemáticos de MDS Aster GDEM v.1 e SRTM v.4.1. Os resultados encontrados pelos autores evidenciaram muitos artefatos no GDEM,

que variavam em valores em função do tipo e forma do terreno. Abrams et al. (2010), também observaram inúmeros artefatos (nuvens, buracos e picos) no GDEM. O efeito dos erros sistemáticos e artefatos contidos nos MDS GDEM, Alos Palsar e SRTM 30 m, especialmente para as áreas planas, foram detectados no presente trabalho (Figura 3), corroborando com os resultados encontrados por estes autores.

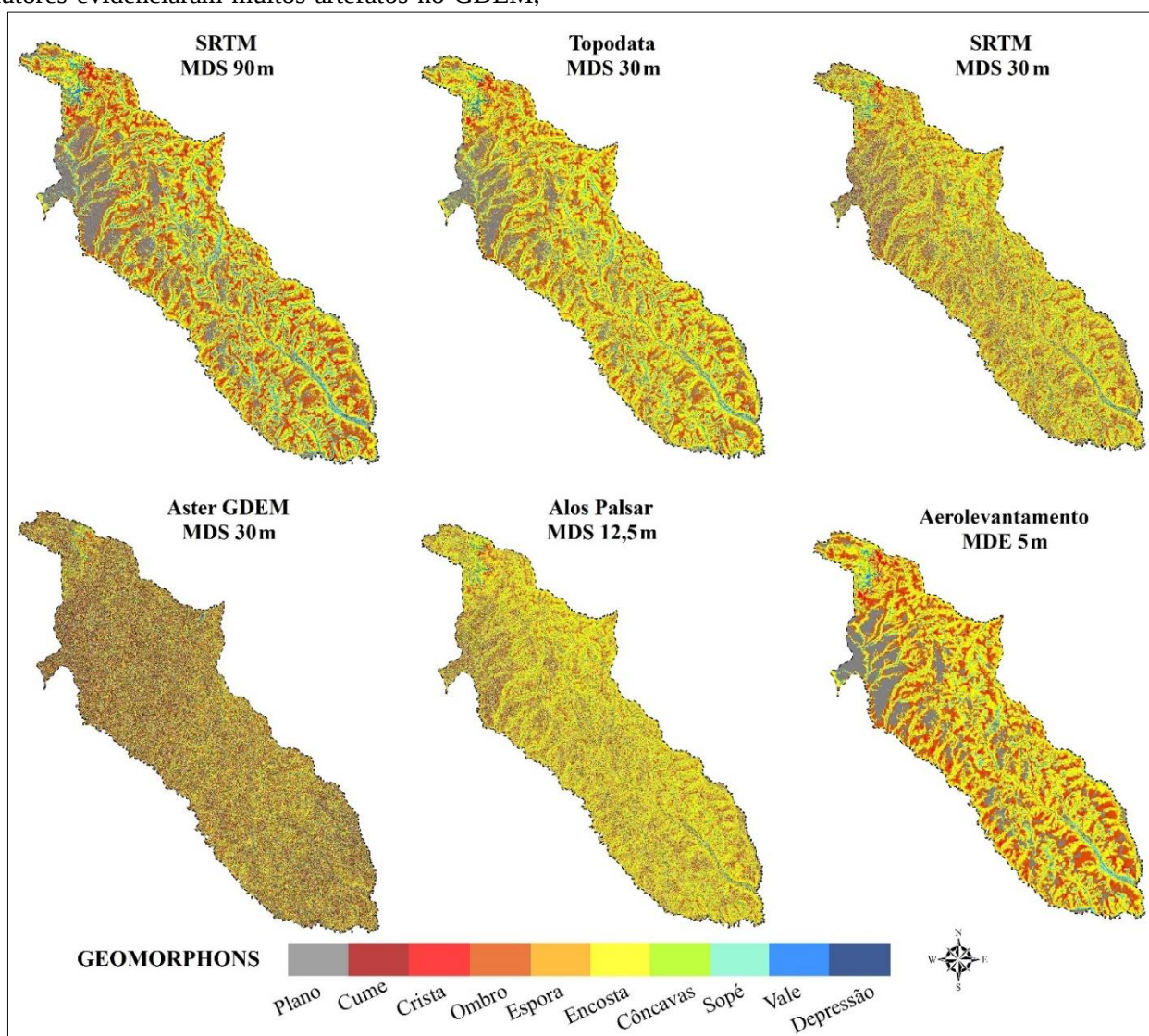


Figura 3. Classes de Geomorphons derivadas de Modelos Digitais de Superfície e Elevação para o município de Campo Grande. Elaboração: Capoane, V.

O MDE gerado com dados do aerolevantamento, na escala 1:10.000, possibilitou uma representação mais realista do terreno do município de Campo Grande (Figura 4). Também evidenciou que muitas características do relevo não são possíveis de serem discriminadas na classificação automatizada utilizando MDS de baixa resolução espacial, e que a reamostragem

(SRTM 90 e Topodata) contribui para a propagação de erros.

A prática de reamostragem de MDS e MDE de baixa resolução espacial para resoluções maiores tem sido criticada por diversos autores como Zhang e Montgomery (1994), Desmet e Govers (1997) e Van Remortel et al. (2001), pois essa prática potencialmente introduz erros de

interpolação, que são propagados em todos os atributos do terreno derivados.

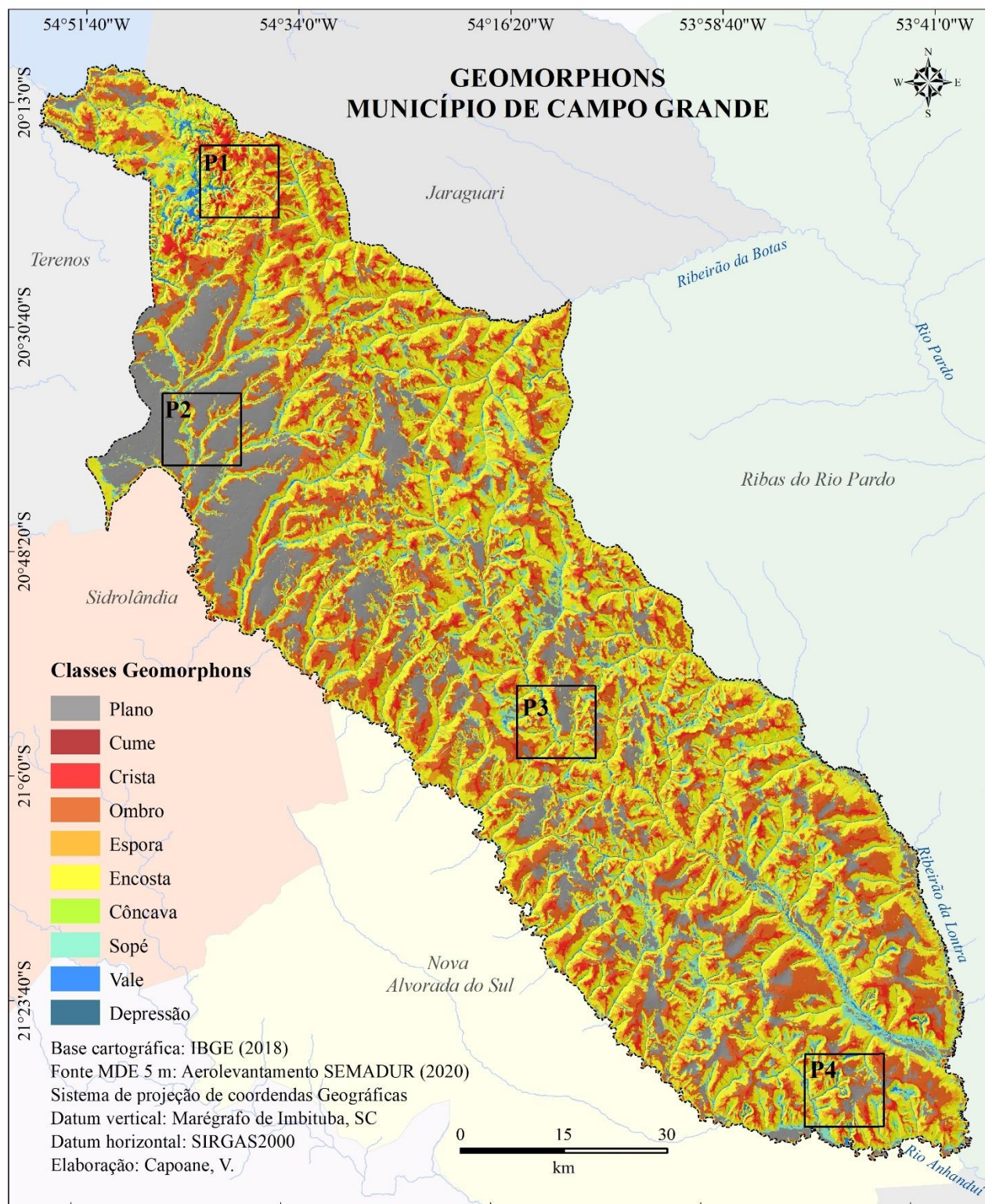


Figura 4. Geomorphons derivadas do Modelo Digital de Elevação com cinco metros de resolução espacial.

Na Figura 5 são apresentados recortes espaciais de quatro regiões distintas do município de Campo Grande (Figura 4): o planalto dissecado da borda ocidental da bacia do Paraná (P1) em área com relevo forte ondulado, montanhoso e

escarpado; no planalto sul-mato-grossense em área de relevo homogêneo e plano (P2); no médio curso do rio Anhanduí (P3) em área com relevo suave ondulado; e em área de interflúvios do baixo curso dos rios Anhanduí e Anhanduízinho (P4).

A análise visual mostra que o relevo derivado do MDE 5 contém detalhes mais refinados da topografia, enquanto o Aster GDEM só foi capaz de preservar as características do

terreno em algumas áreas de relevo forte ondulado na escarpa de erosão do planalto.

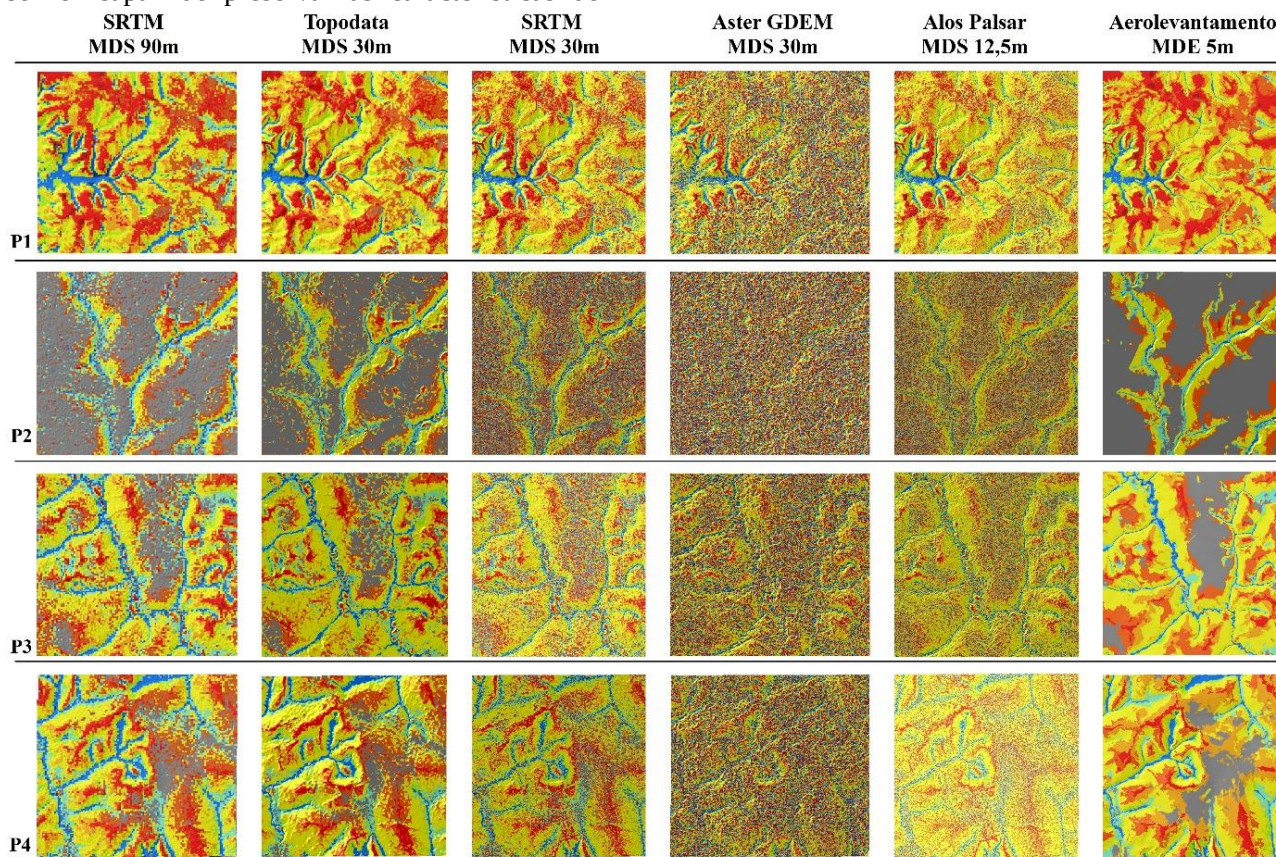


Figura 5. Recorte espacial de quatro regiões do município de Campo Grande. Elaboração: Capoane, V.

Na Figura 6 é apresentada a quantificação das classes de relevo geradas a partir da ferramenta Geomorphons. Considerando a base de maior resolução espacial e escala de mapeamento (MDE 5), o fenótipo plano foi subestimado em todas as bases analisadas, sendo os MDSs SRTM 90 e Topodata os que mais se aproximaram. Porém, essas bases são produto de reamostragem e, quando comparadas ao MDS SRTM 30, houve superestimação da classe plano em 340,5% (SRTM 90) e 315,3% (Topodata). Nas bases Alos Palsar, Aster GDEM e SRTM 30, a área com relevo plano foi subestimada em 6,0%, 1,1% e 24,7%, respectivamente; a área do fenótipo ombro foi subestimada em todas as bases (16,8%, 28,4%, 46,6%, 87,7% e 75,4% - SRTM 90, Topodata, SRTM 30, Aster GDEM e Alos Palsar, respectivamente). A área do fenótipo espora foi subestimada nas bases SRTM 90 (13,5%) e Topodata (3,9%) e superestimada nas bases SRTM 30 (12,7%), Aster GDEM (21,6%) e Alos Palsar (41,6%); o fenótipo encosta teve sua área subestimada nas bases SRTM 90 (15,9%), SRTM

30 (2,2%) e Alos Palsar (10,7%), e superestimado nas bases Topodata (4,7%), SRTM 30 (2,2%) e Aster GDEM (35,96%); para o fenótipo sopé a área foi subestimada nas bases Aster GDEM e Alos Palsar, e superestimada nas bases SRTM 90, Topodata e SRTM 30; nos fenótipos cume, crista, côncava, vale e depressão as áreas foram superestimadas em todas as bases analisadas.

Para as bases produto de reamostragem (SRTM 90 e Topodata), além da suavização do terreno que resultou na superestimação do fenótipo plano quando comparado ao MDS original, características como cume, crista, espora e depressões foram eliminadas. O aumento do tamanho de pixel de 30 para 90 m (SRTM 30 para SRTM 90) e redução de 90 m para 30 m (SRTM 90 para Topodata) mostra que as características topográficas são sensíveis a resolução espacial, e à medida que o tamanho do pixel aumenta, a análise digital do terreno não é capaz de detectar métricas do terreno e as características geomórficas são suavizadas ou eliminadas.

Para Carter (1992), Zhang e Montgomery (1994) e Grohmann (2015), a reamostragem de MDEs e MDSs atenua o relevo e reduz a declividade sistematicamente conforme a resolução espacial diminui (aumenta o tamanho do pixel). Florinsky (1998) e Kienzle (2004) também relataram que variáveis topográficas como

declividade, perfil e plano de curvatura, aspecto e índice topográfico de umidade, não são representados de forma realista quando derivados de modelos altimétricos de baixa resolução espacial.

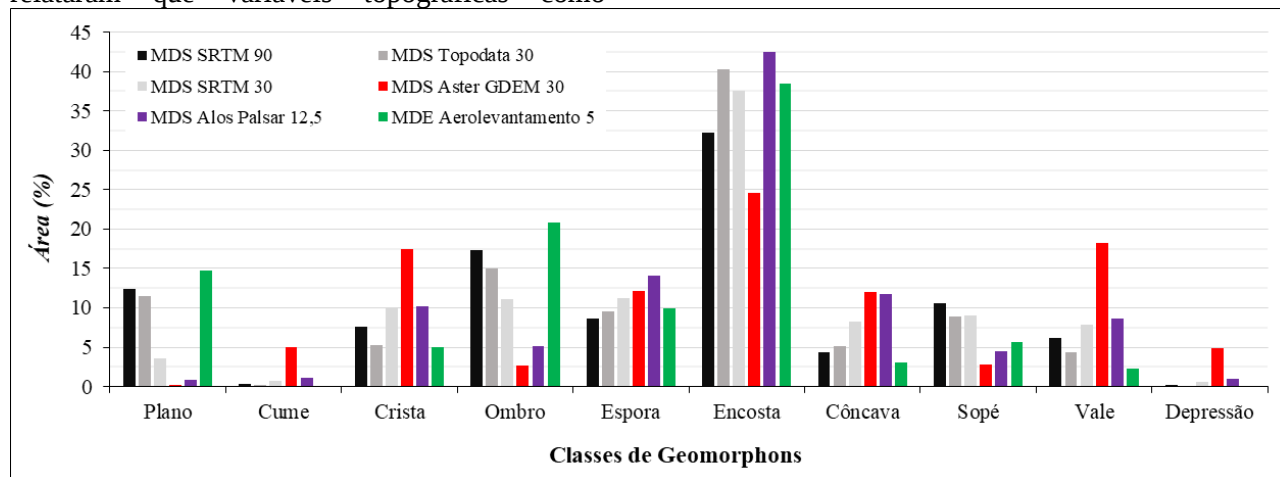


Figura 6. Quantificação das classes de Geomorphons. Elaboração: Capoane, V.

Comparando a área dos fenótipos de relevo derivados de MDSs produto de reamostragem fica evidente a atenuação do relevo (Figura 6). O coeficiente de determinação entre os Geomorphons derivados das bases SRTM 30 vs SRTM 90 foi de R^2 0,8218 e os fenótipos que mais contribuíram para a variância foram plano e ombro; para as bases SRTM 30 m vs Topodata 30 o R^2 foi de 0,8946 e os fenótipos que mais contribuíram para a variância foram plano, crista e ombro e; entre as bases produto de reamostragem (SRTM 90 vs Topodata 30) o R^2 foi de 0,9596. Encosta e ombro apresentaram a menor correlação.

Correlacionando a área dos fenótipos derivados das diferentes bases de dados com as do MDE de maior resolução espacial (Figura 7), a

variabilidade dos fenótipos de relevo foi melhor explicada na base SRTM 90 – R^2 0,9557, o que justifica-se pela reamostragem que alterou as características geomórficas quando comparada ao MDS de aquisição (SRTM 30). Isso também fica evidente observando-se a quantificação de cada fenótipo (Figura 6), em que ombro, encosta, plano e espora foram subestimados em 17, 16, 16 e 14%, respectivamente.

As classes cume, depressão, vale, sopé, crista e côncava foram superestimadas em: 432, 346, 270, 187, 155 e 144%, respectivamente. Grohmann (2015), também constatou a intensificação da densidade de cumes e vales conforme a resolução espacial diminui.

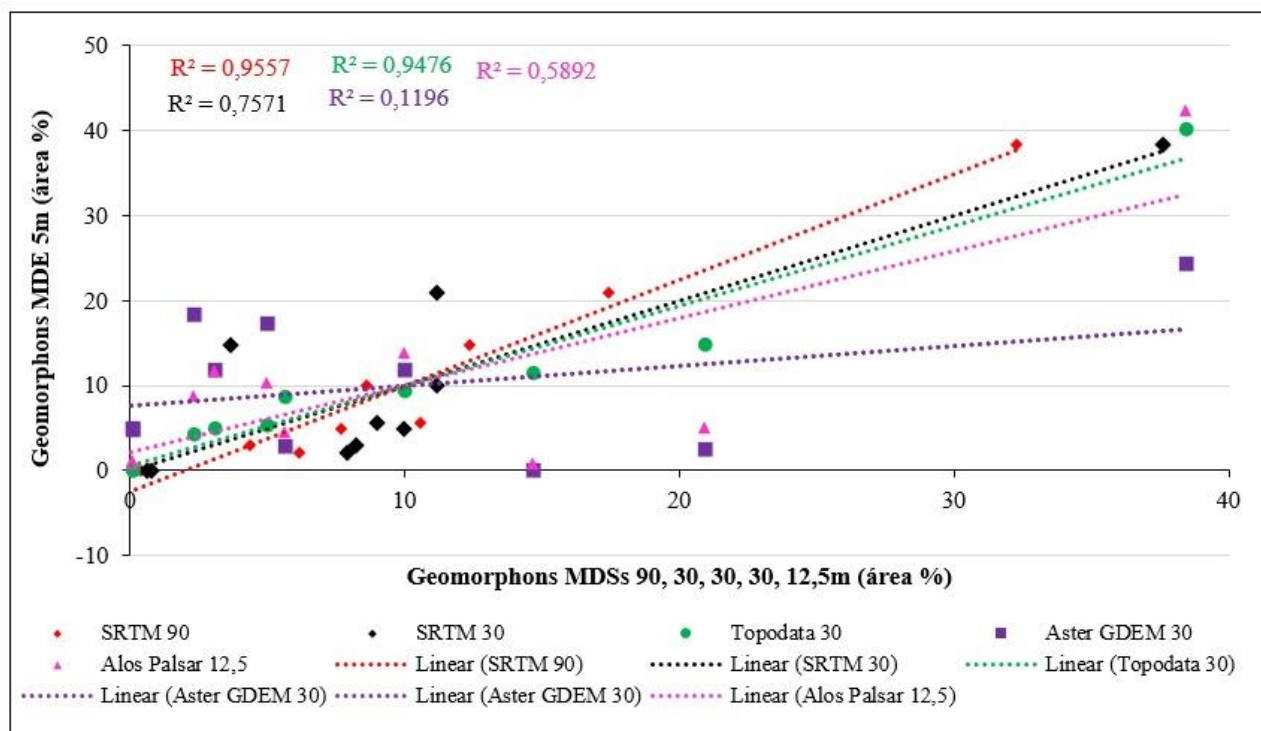


Figura 7. Coeficiente de determinação (R^2) dos geomorphons derivados dos MDSs e MDE. Elaboração: Capoane, V.

Os fenótipos de relevo que mais correlacionaram-se entre si foram ombro, sopé e plano para as bases SRTM 90 e Topodata; espora para as bases SRTM 30 e Alos Palsar. Os fenótipos derivados do MDS Aster GDEM apresentaram a pior correlação (R^2 0,1196) com os derivados da base de maior resolução espacial.

Destaca-se que os MDS utilizados, embora gratuitos, por isso de ampla utilização, apresentam como desvantagem os efeitos da resolução espacial na representação da superfície terrestre, com a generalização de detalhes menores da superfície ou a eliminação de elementos maiores do relevo.

Conforme Band e Moore (1995), as convenções de mapeamento, incluindo o conceito de área mínima mapeável e generalização cartográfica, tendem a alterar a informação original tanto em termos de características espaciais quanto

de atributos. Dessa forma, fenótipos de relevo podem não ser distinguidos na classificação automatizada.

O algoritmo Geomorphons se mostrou promissor para a classificação automatizada do relevo em bases altimétricas de alta resolução espacial (escala de mapeamento apropriada). Contudo, o recorte espacial do baixo curso do rio Anhanduizinho, mostra que o fundo de vale aluvial foi classificado como plano, sopé e pequenas áreas como vale (Figura 8), ou seja, o algoritmo não foi capaz de delinear com precisão os fundos de vale em planícies aluviais (toeslope), que correspondem a uma região relativamente ampla e plana dentro de um vale (Straumann e Purves, 2008), o que mostra a necessidade de ajustes no algoritmo para a discretização adequada dessas áreas.

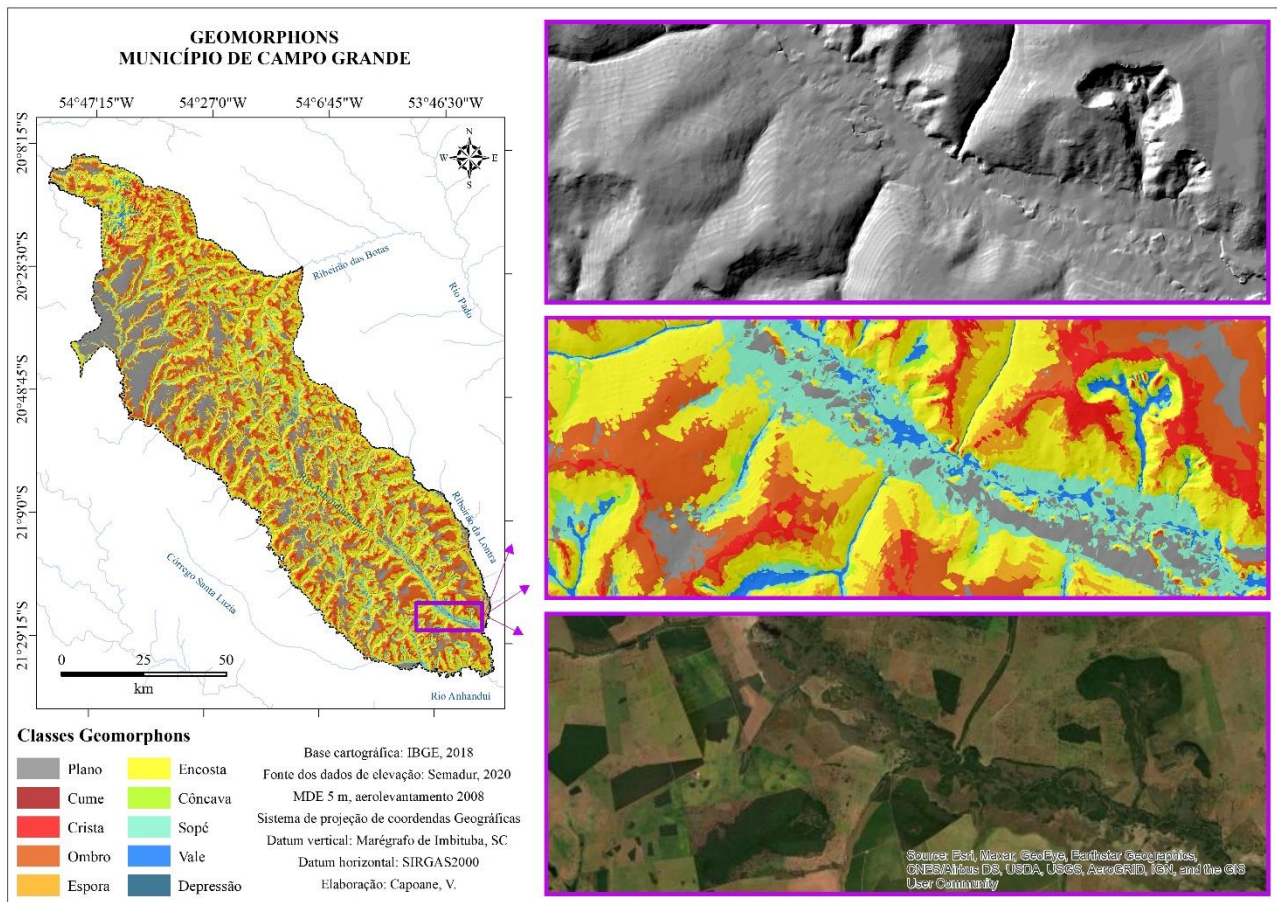


Figura 8. Recorte espacial ilustrando a planície aluvial do rio Anhanduizinho

Conclusão

A classificação automatizada do relevo com o algoritmo Gomorphons é sensível a resolução espacial dos MDSs e MDE. Em resoluções espaciais menores (maior tamanho de pixel), as características do terreno são generalizadas, suavizadas ou não detectadas, o que limita a capacidade preditiva e acurácia dos fenótipos do relevo. A base de maior resolução espacial (MDE 5) representou de forma mais realista a heterogeneidade do relevo do município de Campo Grande.

Embora o algoritmo Geomorphons não tenha representado adequadamente as áreas de planícies aluviais (MDE 5), com um maior desenvolvimento, esta ferramenta pode desempenhar um papel fundamental na classificação automatizada do relevo.

Cabe salientar que a precisão e a acurácia da representação da superfície terrestre a partir de modelos altimétricos depende da escala do mapeamento dos quais os MDEs e MDSs são construídos. A reamostragem (interpolação) para diminuição do tamanho da grade além da resolução original do levantamento/aquisição não aumenta a precisão e acurácia da representação da superfície,

e potencialmente introduz erros de interpolação, que são propagados nos atributos do terreno derivados.

Referências

- Abrams, M., Crippen, R. Aster GDEM V3. 2019. Disponível: https://lpdaac.usgs.gov/documents/434/ASTGT_M_User_Guide_V3.pdf. Acesso: 10 jun. 2020.
- Abrams, M., Bailey, B., Tsu, H., Hato, M. 2010. The ASTER global DEM. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing 76, 344-348.
- Antonic, O., Dalibor, H., Renata, P. 2001. DEM-based depth in sink as an environmental estimator. Ecological Modelling [online] 138. Disponível: [http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3800\(00\)00405-1](http://dx.doi.org/10.1016/s0304-3800(00)00405-1). Acesso: 10 fev. 2022.
- ASF. Alaska Satellite Facility. ALOS PALSAR. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/#/>. Acesso: 20 fev. 2020.
- Atkinson, J., Clercq, W., Rozanov, A. 2020. Multi-resolution soil-landscape characterisation in KwaZulu Natal: using geomorphons to classify local soil scapes for improved digital geomorphological modelling. Geoderma

- Regional [online] 22. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2020.e00291>. Acesso: 10 jul. 2020.
- Band, L.E., Moore, I.D. 1995. Scale: Landscape attributes and geographical information systems. *Hydrological Processes* 9, 401-422.
- Basilici, G., Sgarbi, G.N., Dal' Bó, P.F.F. 2014. A sub-bacia Bauru: um sistema continental entre deserto e cerrado. In: Hasui Y, Carneiro C, Dal Ré; Almeida, F. F. M.; Bartorelli, A. (Orgs.). *Geologia do Brasil*, pp. 520-543.
- Capoane, V. 2020. Implicações da resolução e fonte de modelos altimétricos na análise quantitativa de atributos geomorfométricos para bacia hidrográfica do córrego Guariroba, Campo Grande, MS. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online] 13. Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.5.p2417-2432>. Acesso: 10 jul. 2020.
- Carter, J.R. 1992. The effect of data precision on the calculation of slope and aspect using gridded DEMs. *Cartographica: The International Journal for Geographic Information and Geovisualization* 29, 22-34.
- Cavazzi S. et al. 2013. Are fine resolution digital elevation models always the best choice in digital soil mapping? *Geoderma* [online] 195-196. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.11.020>. Acesso: 10 fev. 2022.
- Cemtec. Centro de Monitoramento do Tempo e do Clima de MS. Banco de dados 2021. Disponível em: <https://www.cemtec.ms.gov.br/boletins-meteorologicos/> Acesso: 10 fev. 2022.
- CGIAR. Consortium for Spatial Information. SRTM 90 m Digital Elevation Database v. 4.1. Disponível: <http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>. Acesso: 20 fev. 2020.
- Conacher, A.J.; Dalrymple, J.B. 1997. Landsurface mapping. *Geoderma* 18, 111-115.
- Dalrymple, J.B.; Blong, R.J.; Conacher, A.J. 1968. A hypothetical nine-unit land surface model. *Zeitschrift für Geomorphologie* 12, 60-76.
- Desmet, P.J.J., Govers, G. 1997. Comment on 'Modeling topographic potential for erosion and deposition using GIS'. *International Journal of Geographical Information Systems* [online] 11. Disponível: <https://doi.org/10.1080/136588197242211>. Acesso: 10 fev. 2022.
- Dietrich, W.E., Wilson, C., Reneau, S.L. 1986. Hollows, colluvium and landslides in soil-mantled landscapes. In: Abrahams, A.D. (Ed.). *Annual Binghamton Symposium in Geomorphologie*, 16, Hillslope Processes. London, Allen & Unwin. p. 361-388. Disponível: <https://doi.org/10.4324/9781003028840-17>. Acesso: 10 jul. 2020.
- Dikau, R., Brabb, E.E., Mark, R.K., Pike, R.J. 1995. Morphometric landform analysis of New Mexico. *Zeitschrift für Geomorphologie supplement Issues* 101, 109-126.
- Diogrande. Diário Oficial de Campo Grande - MS. 2013. Extrato do contrato n. 20, celebrado em 7 de março de 2013. Disponível: <http://www.campogrande.ms.gov.br/seges/wp-content/uploads/sites/37/2017/01/20130401154027.pdf>. Acesso: 23 jan. 2020.
- Dotto, A.V.E, Robaina, L.E.S. Identificação e classificação do relevo do município de São Martinho da Serra – RS. *Ciência e Natura* [online] 43. Disponível: <https://doi.org/10.5902/2179460X42781>. Acesso: 10 fev. 2022.
- Drăguț, L., Blaschke, T. 2006. Automated classification of landform elements using object-based image analysis. *Geomorphology* [online] 8. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.04.013>. Acesso 10 jul. 2020.
- DSI. Divisão de Sensoriamento Remoto - INPE. 2008. Topodata: Projeto de dados geomorfométricos do Brasil. Disponível: <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>. Acesso: fev. 2020.
- Dutra, D.S., Furlan, A.R., Robaina, L.E.S. Compartimentação dos elementos do relevo da bacia hidrográfica do arroio Pantanoso, Canguçu/RS, através da proposta dos geomorphons. *Revista Brasileira de Geografia Física* [online] Disponível: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.2.p713-726>. Acesso: 20 fev. 2022.
- Florinsky, I.V. 1998. Accuracy of local topographic variables derived from digital elevation models. *International Journal of Geographical Information Science* [online] 12. <https://doi.org/10.1080/136588198242003>. Acesso: 10 jul. 2020.
- Fundação SOS Mata Atlântica / INPE. 2020. Atlas dos remanescentes florestais da Mata Atlântica - período 2018-2019. Relatório técnico.
- Furlan, A.R., Trentin, R., Robaina, L.E.S. 2018. Classificação dos elementos do relevo a partir da metodologia dos geomorphons na bacia

- hidrográfica do rio Apuaê-Mirim, RS. Boletim Geográfico do Rio Grande do Sul 32, 27-45.
- Grohmann, C.H. 2015. Effects of spatial resolution on slope and aspect derivation for regional-scale analysis. Computers & Geosciences [online] 77. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.02.003>. Acesso: 10 jun. 2020.
- Grotzinger, J., Jordan, T.H. 2013 Para Entender a Terra. 6. Ed. Porto Alegre: Bookman.
- Guadagnin, P.M.A., Trentin, R. 2019. Classificação do relevo com base nos elementos de Geomorphons e sua relação com a vegetação florestal nativa na Serra do Caverá - Sudoeste do RS, Brasil. Geotextos [online] 15. Disponível: <https://doi.org/10.9771/geo.v15i1.30646>. Acesso: 10 fev. 2022.
- Gutiérrez, F., Gutiérrez, M. 2016. Landforms of the Earth. An Illustrated Guide. Springer, Cham, Disponível: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-26947-4>. Acesso: 20 jun. 2020.
- Gutiérrez, F., Soldati, M. 2018. Landforms. In: Bobrowsky P. T.; Marker, B. (Eds). Encyclopedia of Engineering Geology. Encyclopedia of Earth Sciences Series. Springer, Cham. Disponível: https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_181. Acesso: 10 jun. 2020.
- Hirt, C., Filmer, M.S., Featherstone, W.E. 2010. Comparison and validation of the recent freely available ASTER-GDEM ver1, SRTM ver4.1 and GEODATA DEM-9S ver3 digital elevation models over Australia. Australian Journal of Earth Sciences [online] 57. Disponível: <https://doi.org/10.1080/08120091003677553>. Acesso: 08 jun. 2020.
- Hirt, C. 2018. Artefact detection in global digital elevation models (DEMs): The Maximum Slope Approach and its application for complete screening of the SRTM v4.1 and MERIT DEMs. Remote Sensing of Environment [online] 207. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.12.037>. Acesso: 10 jun. 2020.
- Huggett, R.J. 1975. Soil landscape systems: A model of soil genesis. Geoderma [online] 13. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(75\)90035-X](https://doi.org/10.1016/0016-7061(75)90035-X). Acesso: 12 jun. 2020.
- Hutchinson, M.F. 1989. A new procedure for gridding elevation and streamlines data with automatic removal of spurious pits. Journal of Hydrology [online] 106. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5). Acesso: 10 jun. 2020.
- Hutchinson, M.F., Xu, T., Stein, J.A. 2011. Recent progress in the ANUDEM elevation gridding procedure. Geomorphometry, 19-22.
- Horton, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. Geological Society of America Bulletin [online] 56. Disponível: [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1945\)56\[275:EDOSAT\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1945)56[275:EDOSAT]2.0.CO;2). Acesso: 10 jun. 2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2019. Mapeamento de recurso naturais do Brasil escala 1:250.000. Rio de Janeiro.
- _____. Censo Demográfico 2010. Disponível: <https://censo2010.ibge.gov.br/sinopse/index.php?uf=50&dados=0>. Acesso: 14 out. 2020.
- Igarashi, T. 2001. ALOS mission requirements and specifications. Advances in Space Research [online] 28. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0273-1177\(01\)00316-7](https://doi.org/10.1016/S0273-1177(01)00316-7). Acesso: 10 jun. 2020.
- Iwahashi, J., Pike, R.J. 2007. Automated classifications of topography from DEMs by an unsupervised nested-means algorithm and a three-part geometric signature. Geomorphology [online] 86. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.09.012>. Acesso: 10 jun. 2020.
- Jasiewicz, J., Stepinski, T. 2013. Geomorphons: A pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. Geomorphology [online] 18. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.00>. Acesso: 08 jun. 2020.
- Jenny, H. 1941. Factors of soil formation. New York: McGraw-Hill.
- Julesz, B. 1982. Textons, the elements of texture perception, and their interactions. Nature [online] 290. Disponível: <https://doi.org/10.1038/290091a0>. Acesso: 12 jun. 2020.
- JSS. Japan Space Systems. 2020. ASTER Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM), version 3. Disponível: <https://ssl.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/>. Acesso: 20 fev. 2020.
- Kienzie, S. 2004. The effect of DEM resolution on first order, second order and compound terrain derivatives. Transactions in GIS [online] 8. Disponível: <https://doi.org/10.1111/j.1467-9671.2004.00169.x>. Acesso: 09 set. 2020.

- Lacerda Filho, J.V., Brito, R.S.C., Silva, M.G., Oliveira, C.C., Moreton, L.C., Martins, E.G., Lopes, R.C., Lima, T.M., Larizzatt, J.H., Valente, C.R. 2006. Geologia e recursos minerais do estado de Mato Grosso do Sul - Escala 1:1.000.000. Disponível: <http://rigeo.cprm.gov.br/jspui/handle/doc/10217>. Acesso: 20 fev. 2020.
- Lecours, V., Devillers, R., Edinger, N.E., Brown, J.C., Lucieer, V. 2017. Influence of artefacts in marine digital terrain models on habitat maps and species distribution models: a multiscale assessment. *Remote Sensing in Ecology and Conservation* [online] 3. Disponível: <https://doi.org/10.1002/rse2.49>. Acesso: 12 jun. 2020.
- Lindsay, J.B., Creed, I.F. 2005. Removal of artifact depressions from digital elevation models: towards a minimum impact approach. *Hydrological Processes* [online] 19. Disponível: <https://doi.org/10.1002/hyp.5835>. Acesso: 10 abr. 2020.
- Marques, J.S. 2015. Ciência Geomorfológica. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. (Orgs.) *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. 13. Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 23-45.
- Mckenzie, N.J., Gessler, P.E.; Ryan, P.J.; O'connell, D.A. 2002. The role of terrain analysis in soil mapping. In: Wilson, J.P., Gallant, J.C. (Eds.). *Terrain analysis: Principles and applications*. London: Wiley, p. 245-265.
- Milani, E.J., Araujo, L.M., Cupertino, J.A., Faccini, U.F., Scherer, C.M. 1998. Sequences and stratigraphic hierarchy of the Paraná Basin (Ordovician to Cretaceous), Southern Brazil. *Boletim IG-USP* [online]. Disponível: <https://doi.org/10.11606/issn.2316-8986.v29i0p125-173>. Acesso: 10 jun. 2020.
- Milne, G. 1935. Some suggested units for classification and mapping, particularly for East African soils. *Soil Research* 4, 183-198.
- Mokarram, M., Sathyamoorthy, D. 2018. A review of landform classification methods. *Spatial Information Research* [online] 26. Disponível: <https://doi.org/10.1007/s41324-018-0209-8>. Acesso: 10 jun. 2020.
- Motta, P.E.F. da et al. 2013. Levantamento de reconhecimento de baixa intensidade dos solos do Município de Campo Grande, MS. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. Disponível: http://geoinfo.cnps.embrapa.br/layers/geonode%3Acampo_grande_ms_solos_v2. Acesso: 12 out. 2020.
- Park, S.J., Van De Giesen, N. 2004. Soil-landscape delineation to define spatial sampling domains for hillslope hydrology. *Journal of Hydrology* [online] 295. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.02.022>. Acesso: 10 jun. 2020.
- Pennock, D.J., Zebarth, B.J., De Jong, D. 1987. Landform classification and soil distribution in hummocky terrain, Saskatchewan, Canada. *Geoderma* [online] 40. Disponível: [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(87\)90040-1](https://doi.org/10.1016/0016-7061(87)90040-1). Acesso: 10 jun. 2020.
- Pennock, D.J. 2003. Terrain attributes, landform segmentation, and soil redistribution. *Soil Tillage Research* 69, 15-26.
- Pinheiro, H.S.K. et al. 2016. Applying artificial neural networks utilizing geomorphons to predict soil classes in a brazilian watershed. In: Herausgeber: Zhang, G.-L., Brus, D., Liu, F., Song, X.-D., Lagacherie, P. (Eds.). (Org.). *Springer Environmental Science and Engineering*. 1ed. Singapore: Springer Singapore. 89-102.
- Planurb. Agência Municipal de Meio Ambiente e Planejamento Urbano. 2017. Perfil Socioeconômico de Campo Grande. 24. Ed. rev. Campo Grande.
- Rademann, L.K., Trentin, R. 2018. Compartimentação do relevo de forma automatizada em ambiente SIG na bacia hidrográfica areal do Limeira, Cacequi/RS. *Geographia opportuno tempore* 4, 45-56.
- Reuter, H.I., Hengl, T., Gessler, P., Soille, P. 2009. Preparation of DEMs for geomorphometric analysis. *Developments in Soil Science* [online] 33. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00004-4](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00004-4). Acesso: 10 jun. 2020.
- Robaina, L.E.S., Trentin R., Laurent, F. 2016. Compartimentação do estado do Rio Grande do Sul, brasil, através do uso de geomorphons obtidos em classificação topográfica automatizada. *Revista Brasileira de Geomorfologia* [online] 17. Disponível: <https://doi.org/10.20502/rbg.v17i2.857>. Acesso: 10 fev. 2022.
- Robaina, L.E.S. et al. 2017. Application of the concept of geomorphons to the landform classification in Tocantins State, Brazil. *Revista Ra'e Ga Espaço Geográfico em Análise* [online] 41. Disponível: <https://doi.org/10.5380/raega.v41i0.48724>. Acesso: 10 fev. 2022.

- Ross, J.L.S., Fierz, M.S.M., Nepomuceno, P.L.M., Melo, M.A. 2019. Macroformas do relevo da América do Sul. *Revista do Departamento de Geografia* [online] 38. Disponível: <https://doi.org/10.11606/rdg.v38i1.158561>. Acesso: 10 jun. 2020.
- Ruhe, R.V. 1975. Climatic geomorphology and fully developed slopes. *Catena* [online] 2. Disponível: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(75\)80019-1](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(75)80019-1). Acesso: 10 jun. 2020.
- Ruhe, R.V., Walker, P.H. 1968. Hillslope models and soil formation. I. Open systems. *Transactions of the 9th International Congress of Soil Science* 4, 551-560.
- Ruhe, R.V. 1956. Geomorphic surfaces and the nature of soils. *Soil Science* 82, 441-445.
- SAGA GIS, version 7.7.0. Disponível: <https://sourceforge.net/projects/saga-gis/files/>. Acesso: 30 jun. 2020.
- Saraşan, A., Josza, E., Ardelean, A.C., Drăguţ, L. 2018. Sensitivity of geomorphons to mapping specific landforms from a digital elevation model: A case study of drumlins. *Area* [online] 51. Disponível: <https://doi.org/10.1111/area.12451>. Acesso: 10 jun. 2020.
- Semadur. Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Desenvolvimento Urbano. 2020. Arquivos vetoriais. Disponível: <http://www.campogrande.ms.gov.br/semadur/arquivos-vetoriais-de-campo-grande/>. Acesso: 23 jan. 2020.
- Schmidt, J., Hewitt, A. 2004. Fuzzy land element classification from DTMs based on Geometry and terrain position. *Geoderma* [online] 121. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.10.008>. Acesso: 10 jun. 2020.
- Silva, H.G. et al. 2015. Geomorphometric tool associated with soil types and properties spatial variability. *Scientia Agricola* [online] 73. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0293>. Acesso: 10 fev. 2022.
- Silva, S.H.G. et al. 2016a. Geomorphometric tool associated with soil types and properties spatial variability at watersheds under tropical conditions. *Scientia Agricola* [online] 73. Disponível: <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2015-0293>. Acesso: 15 jun. 2020.
- Silva, M.A. et al. 2016b. Predicting runoff risks by digital soil mapping. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* [online] 40. Disponível: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20150353>. Acesso: 10 fev. 2022.
- Silveira, C.T. et al. 2018. Classificação automatizada de elementos de relevo no estado do Paraná (Brasil) por meio da aplicação da proposta dos geomorphons. *Revista Brasileira De Geomorfologia* [online] 19. Disponível: <https://doi.org/10.20502/rbg.v19i1.1263>. Acesso: 10 fev. 2022.
- Stepinski, T.F., Jasiewicz, J. 2011. Geomorphons — a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. In: Hengl, T. et al. (Eds.). *Proceedings of Geomorphometry*, 109-112. Disponível: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.11.005>. Acesso: 10 jun. 2020.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Transactions, American Geophysical Union* [online] 38. Disponível: . Acesso: 10 jun. 2020.
- Straumann, R.K., Purves, R.S. 2008. Delineation of Valleys and Valley Floors. In: *International Conference on Geographic Information Science, GIScience 2008: Geographic Information Science* [online]. Disponível: https://doi.org/10.1007/978-3-540-87473-7_21. Acesso: 10 jun. 2020.
- Troeh, F.R. 1965. Landform equations fitted to contour maps. *American Journal of Science* [online] 263. Disponível: <https://doi.org/10.2475/ajs.263.7.616>. Acesso: 10 jun. 2020.
- USGS. United States Geological Survey. 2020. Digital Elevation, SRTM, 1 Arc-Second Global. Disponível: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Acesso: 23 jan. 2020.
- Valeriano, M.M., Rossetti, D.F. 2010. Topodata: Seleção de Coeficientes Geoestatísticos para Refinamento Unificado de Dados SRTM. INPE16701-RPQ/853. São José dos Campos: INPE.
- Van Remortel, R.D., Hamilton, M.E., Hickey R.J. 2001. Estimating the LS for RUSLE through iterative slope length processing of digital elevation data within ArcInfo Grid. *Cartography* [online] 30. Disponível: <https://doi.org/10.1080/00690805.2001.9714133>. Acesso: 10 fev. 2022.
- Wechsler, S.P., Kroll, C.N. 2006. Quantifying DEM uncertainty and its effect on topographic parameters. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* [online] 72. Disponível: <https://doi.org/10.14358/PERS.72.9.1081>. Acesso: 10 jun. 2020.
- Wechsler, S.P. 2006. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic

applications: a review. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* [online] 3. Disponível: <https://doi.org/10.5194/hessd-3-2343-2006>. Acesso: 10 jun. 2020.

Wechsler, S.P. 2007. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrology and Earth System Sciences* [online] 11. Disponível: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1481-2007>. Acesso: 10 jun. 2020.

Yokoyama, R., Shirasawa, M., Pike, R.J. 2002. Visualizing topography by openness: a new application of image processing to digital elevation models. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68, 257-266.

Zhang, W., Montgomery, D. 1994. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. *Water Resources Research* [online] 30. Disponível: <https://doi.org/10.1029/93WR03553>. Acesso: 10 jun. 2020.