

IMPACTO DOS PARÂMETROS DE NIVELAMENTO NA CLASSIFICAÇÃO DOS GEOMORPHONS: CASO DA SUB-BACIA DO RIBEIRÃO SANTA GERTRUDES

Marcos Roberto Martines¹
Januário Chirieleison Fernandes²
Carlos Alberto Araújo Campos³
Eduardo Felix Justiniano⁴
Ricardo Vicente Ferreira⁵

INTRODUÇÃO

O relevo é uma variável importante na análise ambiental, atuando em conjunto com elementos como solo, clima e geologia para compor estudos da paisagem (Ross, 1993). Os estudos empíricos da paisagem requerem bases de dados cartográficos que permitam a integração dessas variáveis para diversos fins, tais como: identificação de áreas inundáveis, análise de processos hidrológicos, avaliação da suscetibilidade ou fragilidade a processos erosivos (Ferreira et al., 2022).

As investigações que requerem dados sobre a compartimentação das formas de relevo têm utilizado processos automáticos para a identificação dessas formas, empregando produtos digitais de elevação em diferentes escalas espaciais (Dutra, 2020; Silveira et al., 2017; Robaina et al., 2016). Um desses métodos é o uso de Geomorphons, que são classes de formas de relevo baseadas em padrões topográficos detectados a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE) (Jaziewicz; Stepinski, 2013). Os algoritmos de classificação estão atualmente implementados nos principais Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Contudo, os parâmetros utilizados na geração das classes de relevo podem variar, e essas variações resultam em modificações significativas nos resultados das classificações. No entanto, observa-se uma recorrência nas pesquisas nacionais e internacionais, especialmente no que se refere ao estabelecimento de limiares de nivelamento e distância aplicados na classificação das

¹ Doutor em Geografia Física pela Universidade de São Paulo - SP, mmartines@ufscar.br

² Mestre em Engenharia Civil da Universidade Federal de Uberlândia - MG, januario.fernandes@ufm.edu.br

³ Doutor pela Universidade Estadual Paulista de Jaboticabal - SP, carlos.campos@uftm.edu.br

⁴ Doutorando em Geografia Física pela Universidade de São Paulo - SP, e.justiniano@usp.br

⁵ Doutor em Geografia Física pela Universidade de São Paulo - SP, ricardo.ferreira@uftm.edu.br

unidades de Geomorphons, como pode ser visto nas pesquisas de Jaziewicz; Stepinski, (2013), Robaina et al. (2016), Gouveia e Ross (2019), entre outros.

Os MDE representam a configuração das altitudes terrestres e, em muitas regiões do mundo, ou mesmo em pesquisas que não dispõem de financiamento para custear levantamentos ou a aquisição de produtos mais precisos, os únicos dados disponíveis são MDE globais gratuitos, derivados de dados de satélite (Meadows et al., 2024). No entanto, esses MDE possuem imprecisões conhecidas devido às limitações dos sensores utilizados para sua obtenção, como a incapacidade de penetrar totalmente na cobertura vegetal ou em estruturas construídas, além das limitações das resoluções espaciais (Borghain et. al, 2023).

Por meio de SIG, é possível produzir modelos para o estudo de processos hidrológicos e do movimento da água, como o escoamento superficial, que dependem de dados topográficos da superfície (Zhou, et al., 2021). Os MDE processados em SIG, que representam a superfície topográfica da Terra, excluindo edifícios, vegetação e outros objetos na superfície, mostrando apenas a terra nua, são ferramentas importantes para estudos geomorfológicos (Hawker, et al. 2022). Mas, devem ser utilizados com cautela, pois apresentam imperfeições e limitações que podem afetar suas aplicações, dependendo de fatores como a escala de abordagem e os ruídos de processamento, que geram variações nos produtos derivados dos modelos originais (Saberri, et al., 2023).

O objetivo deste estudo é produzir modelos das unidades de relevo utilizando MDE derivados do sensor Copérnico e avaliar os parâmetros angulares e de distância na geração de Geomorphons para fins de análise da paisagem.

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta pesquisa, foi utilizado o Modelo FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM), disponibilizado em fevereiro de 2022 (Hawker et al, 2022). Este modelo remove distorções de altura de edifícios e árvores do MDE do produto do Copernicus GLO 30 (Airbus, 2020). Os dados estão disponíveis com espaçamento de grade de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 m no equador) terrestre.

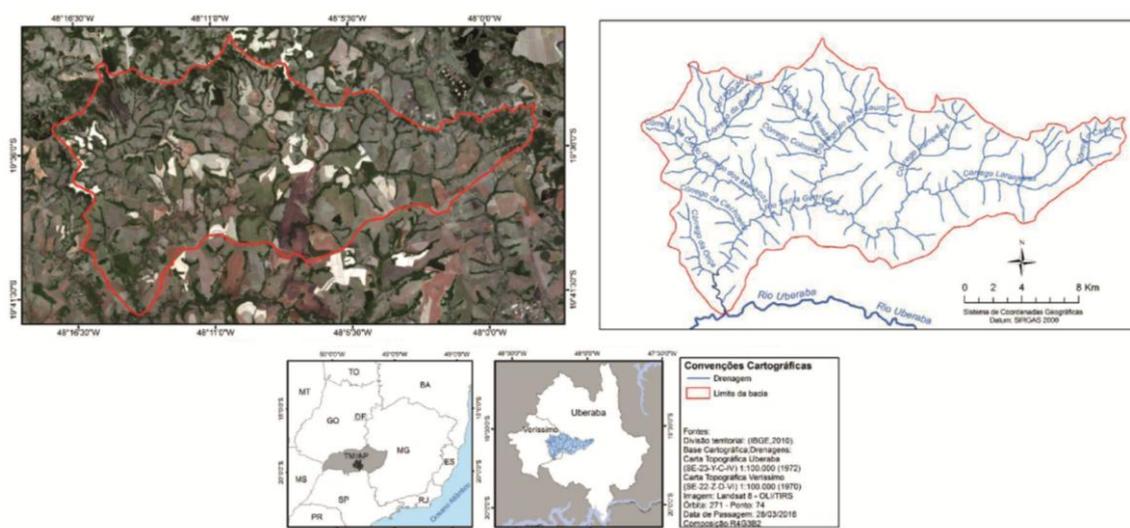
O estudo aqui apresentado seguiu as seguintes etapas: reprojeção do MDE para a referência Sirgas 2000, fuso 22, hemisfério Sul; delimitação automática da bacia do

Córrego Santa Gertrudes com base no FBDEM; aplicação do algoritmo de classificação dos Geomorphons disponível no software SAGA.

Área de Estudo

A sub-bacia do ribeirão Santa Gertrudes está localizada nos Municípios de Uberaba e Veríssimo na Região do Triângulo Mineiro, no Estado de Minas Gerais, (Figura 1). Sendo a mesma, tributária direta do rio Uberaba, e que vem apresentando, uma forte evolução de ocupação pela agropecuária, perfazendo cerca de 33% do território (Campos, 2017)

Figura 1. Bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Gertrudes-MG.



A base de referência para a geração dos Geomorphons se pautou em parâmetros amplamente utilizados na literatura brasileira. A partir desses parâmetros, foram avaliados os resultados no que diz respeito à geração de unidades de relevo (Dutra et al., 2020; Gouveia; Ross, 2019; Silveira et al., 2018; Lamberty et al., 2017; Robaina et al., 2016).

Os Geomorphons gerados automaticamente pelo SAGA estão inseridos no contexto das ferramentas de cálculo de iluminação e visibilidade aplicadas sobre MDE. Estes recursos fornecem produtos para a análise qualitativa do terreno. Para a geração dos Geomorphons, é necessário definir os parâmetros ajustáveis "L", que representa a distância em metros ou unidades de pixel, e o limiar de nivelamento em graus. O valor de "L" aplicado corresponde a pixels, e neste estudo foi calculado com base na resolução espacial de 30 metros do FABDEM, utilizando 20 pixels de referência, resultando em um parâmetro de 600 metros. Esse limiar baseia-se em pesquisas nacionais (Silveira et al., 2018; Lamberty et al., 2017; Robaina et al., 2016). Com

relação ao parâmetro de nivelamento em graus, adotou-se o limiar de 1° e 2°, a análise que se segue neste artigo se faz com base nestes 2 parâmetros.

Os resultados foram analisados em termos descritivos, considerando as classes de Geomorphons geradas, suas áreas e as porcentagens em relação à área da Bacia do Córrego Santa Gertrudes.

REFERENCIAL TEÓRICO

Os Geomorphons surgiram como uma nova abordagem na classificação das formas do relevo e foram idealizados na pesquisa de Stepinski e Jasiewicz (2011). Essa abordagem se baseou nos avanços apresentados por Yokoyama et al. (2002) na visualização topográfica por meio do processamento de MDE. Em síntese, os Geomorphons resultam em 10 unidades elementares do terreno classificadas a partir da análise dos padrões de altitude de uma matriz MDE. Essas unidades representam tanto características do terreno quanto tipos de formas de relevo, facilitando o mapeamento dessas formas em um determinado local em estudo (Jasiewicz e Stepinski, 2013).

No Brasil, as primeiras aplicações dos Geomorphons iniciaram em 2016 no mapeamento dos compartimentos de formas de relevo para o estado do Rio Grande do Sul, utilizando classificação automatizada de MDE obtidos pela *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), com resolução espacial de 3 arcos de segundo (90 metros) (Robaina et al., 2016).

No modelo dos geomorphons replicado em diversas pesquisas brasileiras (Dutra et al., 2020; Gouveia & Ross, 2019; Silveira et al., 2018; Lamberty et al., 2017; Robaina et al., 2016), os parâmetros utilizados para descrever a superfície do relevo são a distância e o ângulo de direção dos pontos vizinhos (pixels). Nessas aplicações, os conjuntos de dados raster utilizados geralmente foram provenientes do SRTM. Os dois parâmetros ajustáveis são a distância "L" (em metros ou unidades de pixel) e o "threshold" (limiar de nivelamento em graus), definidos como 20 pixels (1800 metros) e 2° (dois graus), respectivamente. Já na literatura internacional, o limiar de nivelamento geralmente é utilizado em 1° (Stepinski; Jasiewicz, 2011; Jasiewicz; Stepinski, 2013), sendo também esse o padrão default nos softwares SAGA e GRASS.

A classificação automatizada dos Geomorphons é sensível à escala de mapeamento e à resolução espacial dos MDE e também nos Modelos Digitais de

Superfície (MDS). A identificação dos elementos do relevo utilizando uma base com maior resolução espacial (MDE de 5 metros) proporcionou uma representação mais realista da heterogeneidade do relevo, especialmente em análises locais, como em municípios (Capoane; Amorim, 2022). De modo geral, a aplicação da metodologia dos Geomorphons para a classificação automatizada dos elementos do relevo mostrou-se eficaz em nível estadual, como nos casos do Paraná e do Rio Grande do Sul (Silveira et al., 2018; Robaina et al., 2016). Em análises regionais, o agrupamento dos elementos identificados permitiu a visualização de compartimentos geomorfológicos homogêneos. A técnica dos Geomorphons demonstrou ser bastante eficiente na delimitação de diferentes compartimentos de formas de relevo (Dutra et al., 2020).

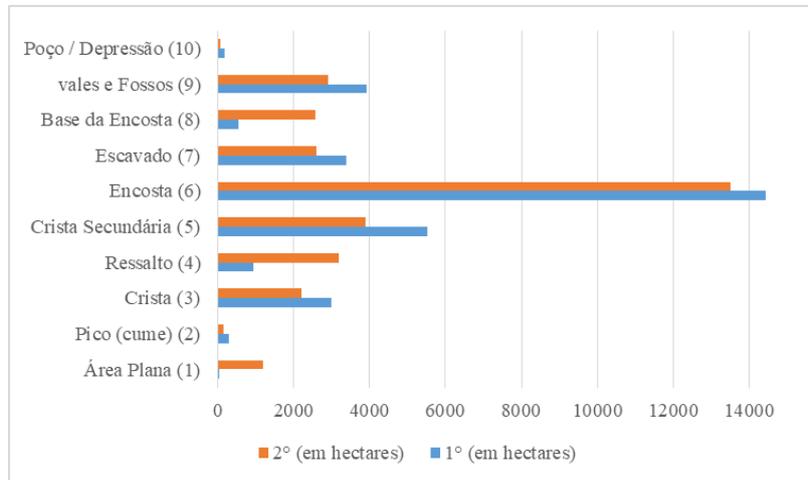
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A adoção de diferentes limiares para a classificação de áreas planas mostrou que as unidades de Geomorphons são afetadas como um todo. Em linhas gerais, a área estudada é caracterizada por Geomorphons dos tipos Crista Secundária (5), Encosta (6) e Vales e Fossos (9) (Tabela 1). As variações na classificação foram mais significativas nas Áreas Planas (1), localizadas nos patamares mais elevados, nos Ressaltos (4) e nas Bases das Encostas (6) (Figura 2).

Tabela 1. Áreas classificadas segundo as categorias de Geomorphons e o parâmetro de nivelamento em 1° e 2° graus.

Geomorphons	1° (ha)	2° (ha)	Diferença de áreas (ha)	% variação
Área Plana (1)	36.9	1196.7	1159.8	94.0
Pico (cume) (2)	294.8	158	136.8	30.2
Crista (3)	2985.7	2194	791.7	15.3
Ressalto (4)	935.1	3194.4	2259.3	54.7
Crista Secundária (5)	5528.4	3902.2	1626.2	17.2
Encosta (6)	14441.6	13503.1	938.5	3.4
Escavado (7)	3399.2	2589.5	809.7	13.5
Base da Encosta (8)	549.9	2559.1	2009.2	64.6
Vales e Fossos (9)	3911.8	2908.3	1003.5	14.7
Poço / Depressão (10)	183.1	61.2	121.9	49.9

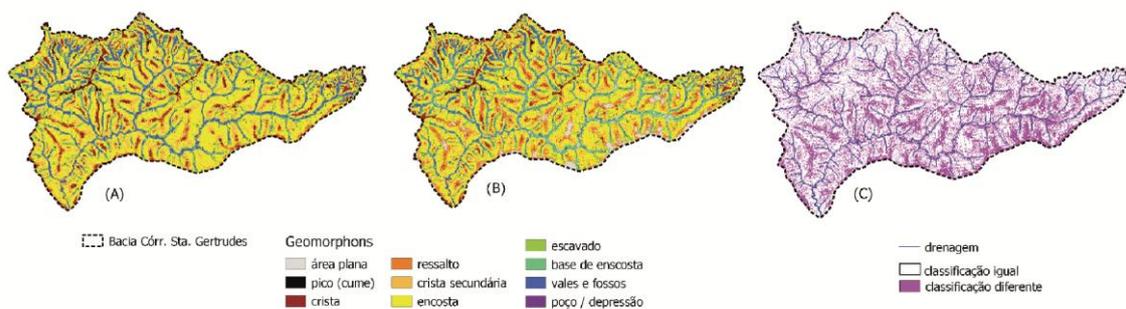
Figura 2. Categoria Geomorphons e áreas classificadas segundo o parâmetro de nivelamento em 1° grau e 2° graus.



A adoção do parâmetro de nivelamento de 1° grau destacou os Vales e Fossos (9). Considerando que na Bacia do Córrego Santa Gertrudes não há ocorrência de fossos, pode-se inferir que esta categoria se refere aos fundos de vale que acompanham a drenagem da bacia (Figura 3). As Cristas (3), Encostas (6) e Cristas Secundárias (5) também foram realçadas pelo parâmetro de 1°.

Ao todo, em termos de áreas classificadas, a adoção do parâmetro de 1° de nivelamento resultou em uma variação de 33,6% em áreas classificadas em categorias distintas, comparativamente ao uso do parâmetro de 2° (Figura 3).

Figura 3. Classificação de Geomorphons. (A) com parâmetro de nivelamento de 1° grau; (B) com parâmetro de nivelamento de 2° graus; (C) diferença de classificação entre os modelos (A) e (B).



Com base nesses resultados, é razoável considerar a aplicação do limiar de 1° de nivelamento para delinear mais precisamente as formas de relevo da Bacia do Córrego

Santa Gertrudes. Esse limiar mostrou-se mais eficaz na identificação de áreas inundáveis em fundos de vale, que são de grande interesse para a determinação de níveis de fragilidade em pesquisas. Tomando como exemplo os resultados apresentados, a adoção do limiar de 1° para o nivelamento das formas de relevo pode ser mais efetiva do que o uso de 2°, como sugerido na proposta de aplicação dos Geomorphons para análise de fragilidade ambiental por Gouveia e Ross (2019). Além disso, no modelo de fragilidade de Ross (2012), é indicado que declividades menores que 1° em relevos de planícies fluviais devem ser caracterizadas como ambientes de muito alta fragilidade. Nessa pesquisa, essas formas foram melhor delineadas com o uso do parâmetro de nivelamento de 1°.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A classificação automatizada das formas do relevo pelos Geomorphons é sensível aos parâmetros de nivelamento e distância utilizados. Neste estudo, o modelo FABDEM foi usado para mapear as unidades de relevo na sub-bacia do ribeirão Santa Gertrudes, destacando características como Cristas Secundárias, Encostas e Vales e Fossos com um nivelamento de 1°. Este limiar delineou a classe Vales e Fossos, sugerida para modelagens hidrológicas e identificação de áreas propensas a inundações em regiões onde a topografia influencia a dinâmica hídrica. A variação de 33,6% nas áreas classificadas ao usar o limiar de 1° em vez de 2° mostra que pequenas alterações nos parâmetros podem impactar significativamente a representação das formas de relevo. A aplicação dos Geomorphons pode ser expandida para análises regionais e estaduais, facilitando a delimitação de compartimentos geomorfológicos homogêneos. Contudo, a falta de validação de campo direta pode comprometer a confiabilidade das classificações, e a validação por meio de dados de campo poderia fornecer uma avaliação mais precisa dos resultados.

As unidades de Geomorphons são classes generalizadas de formas de relevo que podem conter simplificações ou ruídos, impactando a interpretação das características do relevo. A sensibilidade dos Geomorphons aos parâmetros escolhidos, como o limiar de nivelamento e a distância "L", pode afetar significativamente os resultados. Este estudo focou na análise do limiar de nivelamento, alinhando-se aos procedimentos de

pesquisas brasileiras, mas os resultados baseados na sub-bacia do ribeirão Santa Gertrudes devem ser interpretados com cuidado em outros contextos.

REFERÊNCIAS

- BORGOHAIN, A. et al. Comparison of Geomorphological Parameters Detected Using MERIT and FABDEM Products. **Environmental Sciences Proceedings**, v. 25, n. 1, p. 59, 2023.
- CAMPOS, C. A. A. Os compartimentos da paisagem e a elaboração de uma matriz para o planejamento ambiental em uma bacia hidrográfica com uso intensivo da agricultura: bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Gertrudes, Veríssimo-MG. **Tese Doutorado** – Universidade do Estado de São Paulo - Jaboticabal, 2017.
- CAPOANE, V.; AMORIM, A. E. S. Classificação automatizada do relevo utilizando a ferramenta Geomorphons: estudo de caso para o município de Campo Grande – MS. **Revista Brasileira De Geografia Física**, v. 15, n. 2, p. 750–766, 2022.
- DUTRA, D. S. et al. Compartimentação dos elementos do relevo da bacia hidrográfica do arroio Pantanoso–Canguçu/RS, através da proposta dos Geomorphons. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 13, n. 02, p. 713-726, 2020.
- FERREIRA, R. V. et al. Environmental Fragility in a Permanent Preservation Area. **Floresta e Ambiente**, v. 29, n. 4, p. e20220027, 2022.
- GOUVEIA, I. C. M.; ROSS, J. L. S. Fragilidade Ambiental: uma proposta de aplicação de Geomorphons para a variável relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 37, p. 123-136, 2019.
- JASIEWICZ, J.; STEPINSKI, T. F. Geomorphons—a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms. **Geomorphology**, v. 182, p. 147-156, 2013.
- LAMBERTY, D. et al. Compartimentação geomorfológica por Geomorphons do Morro da Polícia, Porto Alegre, como subsídio para a análise de suscetibilidade ao desenvolvimento de processos de dinâmica superficial. 2017.
- MEADOWS, M. et al. Vertical accuracy assessment of freely available global DEMs (FABDEM, Copernicus DEM, NASADEM, AW3D30 and SRTM) in flood-prone environments. **International Journal of Digital Earth**, v. 17, n. 1, p. 2308734, 2024.
- ROSS, J. L. S. Landforms and environmental planning: Potentialities and Fragilities. **Revista do Departamento de Geografia**, p. 38-51, 2012.
- SABERI, A. et al. Accuracy assessment and improvement of SRTM, ASTER, FABDEM, and MERIT DEMs by polynomial and optimization algorithm: A case study (Khuzestan Province, Iran). **Open Geosciences**, v. 15, n. 1, p. 20220455, 2023.
- SILVEIRA, C. T. et al. Classificação automatizada de elementos de relevo no estado do Paraná (Brasil) por meio da aplicação da proposta dos Geomorphons. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, v. 19, n. 1, 2018.
- STEPINSKI, T. F.; JASIEWICZ, J. Geomorphons—a new approach to classification of landforms. **Proceedings of Geomorphometry**, v. 2011, p. 109-112, 2011.
- YOKOYAMA, R.; SHIRASAWA, M.; PIKE, R. J. Visualizing topography by openness: A new application of image processing to digital elevation models. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 68, n. 3, p. 257-266, 2002.
- ZHOU, Q.; SU, J.; ARNBJERG-NIELSEN, K.; REN, Y.; LUO, J.; YE, Z.; FENG, J. A GIS-based hydrological modeling approach for rapid urban flood hazard assessment. **Water**, v. 13, n. 11, p. 1483, 2021.