



AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DERIVADOS DOS MDES GLO-30 E ANADEM COM O TOPOTOOLBOX NA SERRA DO CARAÇA, MG

Raissa Eduarda da Silva Archanjo¹

Leandro Henrique Cunha Fermino²

Pablo César Serafim³

Isabella Oliveira Carvalho⁴

Ronaldo Luiz Mincato⁵

Felipe Gomes Rubira⁶

RESUMO

A representação precisa do relevo e da rede de drenagem depende tanto da qualidade dos Modelos Digitais de Elevação (MDEs) quanto dos algoritmos de roteamento de fluxo utilizados. Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar e comparar, por meio do TopoToolbox 2, parâmetros morfométricos derivados dos MDEs Copernicus GLO-30 e ANADEM na Serra do Caraça (MG), considerando: (i) variáveis morfométricas do relevo (declividade, curvatura, orientação, rugosidade e altimetria); (ii) variáveis morfométricas da rede de drenagem (acumulação de fluxo, distância ao exutório, ordem de Strahler, relação declividade-área e sinuosidade); e (iii) área média de contribuição, com base nos algoritmos *Deterministic 8-neighbors (D8)*, *D-Infinity (D_{∞})* e *Multiple Flow Direction (MFD)*, aplicados com diferentes pré-processamentos (sem correção, *fill* e *carve*). Os resultados indicam que o preenchimento de depressões (*fill*) aumentou as áreas de contribuição em ambos os MDEs, enquanto o esculpimento de canais (*carve*) não gerou alterações. O D_{∞} apresentou as menores áreas de contribuição devido à sua abordagem vetorial contínua que dispersa o fluxo em duas direções quando necessário; enquanto o *MFD*, ao distribuir o escoamento para múltiplos vizinhos, superestimou essas áreas, especialmente em terrenos planos. O algoritmo *D8* com preenchimento (*fill*) apresentou desempenho mais compatível com a morfologia da Serra do Caraça. Esses resultados destacam a importância da escolha criteriosa do MDE, do algoritmo de roteamento e do método de correção, sobretudo em análises que exigem maior precisão na modelagem morfométrica da drenagem.

INTRODUÇÃO

Os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) são representações da superfície terrestre obtidas por meio de aquisição, interpolação e filtragem de dados altimétricos (Hirt; Filmer; Featherstone, 2010; Drăguț; Eisank, 2012). No entanto, esses modelos frequentemente contêm

¹ Mestranda pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, raissa.archanjo@sou.unifal-mg.edu.br;

² Mestrando pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, leandro.fermino@sou.unifal-mg.edu.br;

³ Mestrando pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, pablo.serafim@sou.unifal-mg.edu.br;

⁴ Mestranda pelo Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, isabella.carvalho@sou.unifal-mg.edu.br;

⁵ Prof. Dr. Ronaldo Luiz Mincato, Instituto de Ciências da Natureza - ICN, Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, ronaldo.mincato@unifal-mg.edu.br;

⁶ Professor orientador: Prof. Dr. Felipe Gomes Rubira, Instituto de Ciências da Natureza - ICN, Universidade Federal de Alfenas - UNIFAL-MG, felipe.rubira@unifal-mg.edu.br.



ruídos decorrentes de elementos como copas de árvores, edificações, pontes e reservatórios, que mascaram feições reais do relevo e da rede de drenagem (Schwanghart; Scherler, 2017; Grande; Rubira, 2024). Esses erros, sejam aleatórios ou sistemáticos, estão relacionados à resolução espacial, à instrumentação e à metodologia de coleta, especialmente em MDEs derivados de radar, que costumam apresentar distorções por ruídos térmicos, sincronização temporal e imprecisões de posicionamento (Falorni et al., 2005; Rizzoli et al., 2012).

Wechsler (2007) e Fisher e Tate (2006) discutem os impactos desses erros na derivação de parâmetros morfométricos e destacam a necessidade de métodos e ferramentas eficazes para mitigá-los. Nesse contexto, o TopoToolbox, desenvolvido em ambiente MATLAB, tem sido amplamente utilizado para processamento topográfico e análise de drenagem (Schwanghart; Kuhn, 2010; Schwanghart; Scherler, 2014, 2017; Stolle et al., 2018; Schwanghart; Molkenthin; Scherler, 2021). O TopoToolbox 2 opera com redes acíclicas direcionadas, promove maior eficiência computacional e permite modelar fluxos de drenagem com baixo custo de processamento (Schwanghart; Scherler, 2017).

Os principais métodos de roteamento de fluxo disponíveis no TopoToolbox incluem o *Deterministic 8-neighbors (D8)*, o *D-Infinity (D^∞)* e o *Multiple Flow Direction (MFD)*. O algoritmo *D8* direciona o escoamento para a célula vizinha com a maior declividade entre oito direções possíveis (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW), é eficiente em áreas fortemente dissecadas, mas apresenta limitações em superfícies planas ou pouco inclinadas (Jenson; Domingue, 1988). O *D $^\infty$* , proposto por Tarboton (1997) e implementado no TopoToolbox a partir dos algoritmos de Eddins (2016), calcula vetores de declividade máxima contínua, permitindo ao fluxo seguir qualquer direção vetorial e, quando necessário, dividir-se entre dois vizinhos adjacentes. O *MFD*, por sua vez, distribui o fluxo simultaneamente para todos os vizinhos mais baixos, proporcionalmente à declividade local, sendo mais adequado para planícies aluviais e áreas com relevo suavemente ondulado (Ariza-Villaverde; Jiménez-Hornero; Gutiérrez De Ravé, 2015).

Diante desse contexto, este trabalho tem como objetivo analisar e comparar, por meio do TopoToolbox 2, parâmetros morfométricos derivados de dois Modelos Digitais de Elevação amplamente utilizados: o Copernicus GLO-30 (Airbus, 2022) e o ANADEM (Laipelt et al., 2023). A comparação é estruturada em três níveis de análise: (i) parâmetros morfométricos do relevo, incluindo declividade, curvatura, orientação das vertentes, rugosidade e altimetria; (ii) parâmetros morfométricos da rede de drenagem, como acumulação de fluxo, distância ao exutório, ordem hierárquica, relação declividade-área e sinuosidade; e (iii) área de contribuição média obtida a partir da aplicação de diferentes algoritmos de roteamento de fluxo (*D8*, *D $^\infty$* e

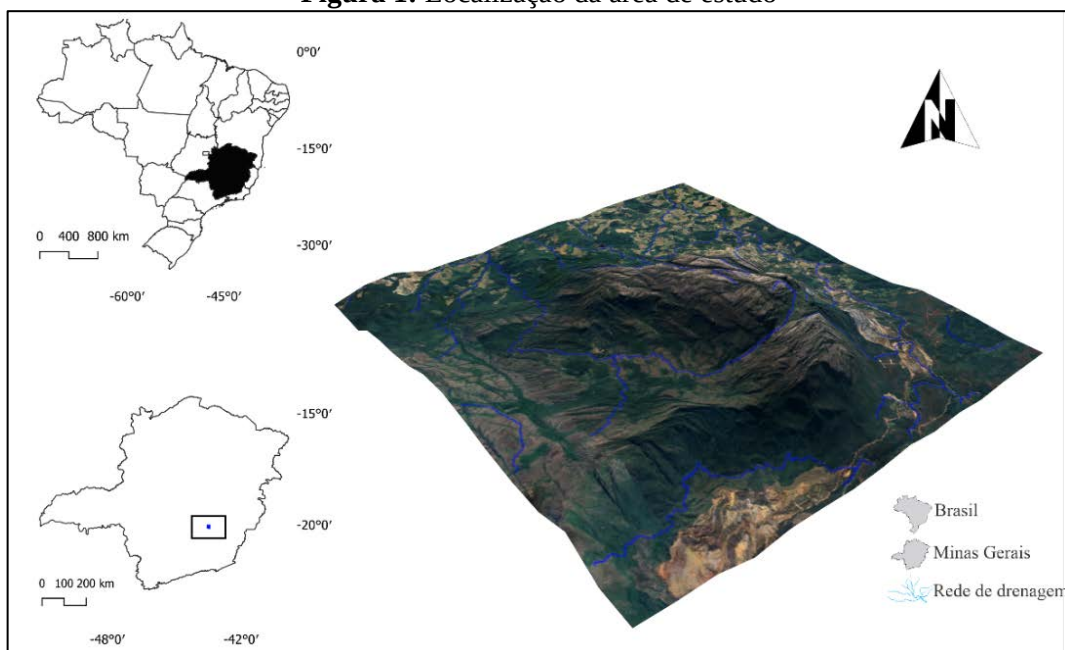
MFD) e pré-processamentos (sem correção, com preenchimento de depressões e com esculpimento de canais).

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

A área analisada situa-se na mesorregião metropolitana de Belo Horizonte, entre as microrregiões de Itabira e Ouro Preto, abrangendo os municípios de Catas Altas, Santa Bárbara e Mariana (Figura 1).

Figura 1: Localização da área de estudo



Fonte: Autores (2025)

Conforme a classificação de Köppen-Geiger (1936), predominam os climas subtropicais CWa (inverno seco, verão quente) e Cwb (inverno seco, verão temperado). A região insere-se no domínio morfoclimático de mares e morros, composto por mamelões florestados em ambiente de cinturões móveis neoproterozoicos (Ab'Sáber, 2003). A Serra do Caraça, localizada no Quadrilátero Ferrífero junto à borda sudoeste do Cráton do São Francisco, apresenta relevo fortemente dissecado com altitudes superiores a 1 500 m.

MATERIAS

Foram utilizados dois MDEs: o Copernicus GLO-30, um Modelo Digital de Superfície (MDS) derivado do WorldDEM por dados estereoscópicos InSAR (TanDEM-X), ajustado hidrologicamente e integrado a modelos auxiliares como SRTM, ASTER e AW3D30 (Airbus,

2022); e o ANADEM, um Modelo Digital de Terreno (MDT) processado com imagens multiespectrais de Landsat-8 e Sentinel-2 para correção do viés vegetacional no GLO-30 (Laipelt et al., 2023).

MÉTODOS

O processamento foi realizado no TopoToolbox 2, via MATLAB R2021a. Primeiramente, os MDEs foram reprojetados para o sistema UTM Zona 23S e reamostrados em resolução de 30 metros. Em seguida, testaram-se cinco configurações de roteamento de fluxo: (1) *D8* sem pré-processamento; (2) *D8* com preenchimento (*fill*); (3) *D8* com esculpimento (*carve*); (4) $D\infty$; e (5) *MFD*.

Após a definição da direção de fluxo (via *FLOWobj*), foi imposto um declive mínimo de 0,0001 m/m para garantir conexão hidrológica. Em seguida, calculou-se a acumulação de fluxo (*flowacc*) e extraiu-se a rede de drenagem com *STREAMobj*, adotando área mínima de contribuição de 500 *pixels*. A rede topológica foi gerada apenas por métodos baseados em *D8*, pois o TopoToolbox não suporta conectividade para redes derivadas de $D\infty$ e *MFD*. No entanto, mesmo sem rede explícita, foi possível calcular a área de contribuição para todos os algoritmos, viabilizando comparações morfométricas da drenagem.

Com os dados processados, extraiu-se os parâmetros morfométricos definidos na introdução, incluindo métricas de relevo, da rede de drenagem e da área média de contribuição sob diferentes algoritmos e pré-processamentos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS DO RELEVO DERIVADOS DOS MDES

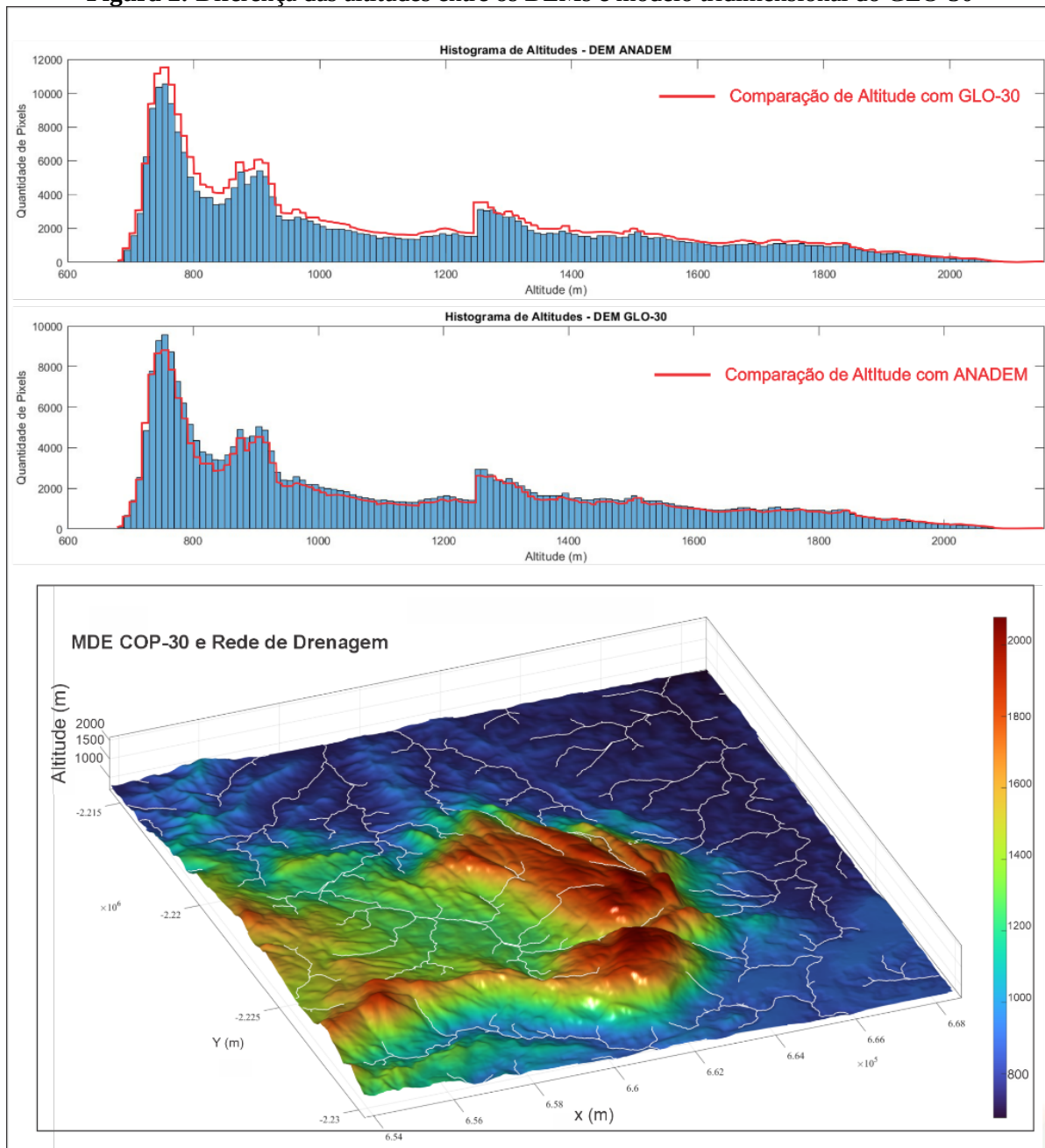
O GLO-30 apresenta altitude máxima de 2082 m, enquanto o ANADEM alcança 2078 m; ambos compartilham a mesma altitude mínima (675 m) (Tabela 1). A maior presença de pixels acima de 1400 m no GLO-30 reflete sua condição de modelo de superfície, que inclui vegetação e estruturas sobre o terreno. A baixa variabilidade altimétrica entre modelos decorre das formações quartzíticas e da vegetação rupestre, que fornecem estimativas altimétricas estáveis em topos elevados.

Tabela 1: Parâmetros morfométricos do relevo derivados dos MDEs da Serra do Caraça

Parâmetros morfométricos	GLO-30	ANADEM	Unidades
Altimetria média	2082	2078	metros (m)
Declividade média	0,33	0,33	m/m (razão)
Curvatura média	0,00	0,00	adimensional
Orientação média das vertentes	167,64	167,18	graus (°)
Rugosidade média	15,11	14,12	metros (m)

A análise dos histogramas altimétricos (Figura 2A) revelou uma distribuição trimodal das altitudes em ambos os modelos, com picos em aproximadamente 700–800 m, 850–950 m e 1000–1100 m, indicando compartimentação geomorfológica distinta na Serra do Caraça, possivelmente associados a vales encaixados, encostas intermediárias e topos elevados, respectivamente (Figura 2B).

Figura 2: Diferença das altitudes entre os DEMs e modelo tridimensional do GLO-30



Fonte: Autores (2025)

A declividade média idêntica (0,33 m/m) sugere representação semelhante das inclinações gerais. A curvatura média nula (0,00) reflete equilíbrio entre vertentes côncavas e convexas, compatível com a variação topográfica observada (Figura 2B). A orientação das vertentes apresenta valores próximos (167,64° no GLO-30 e 167,18° no ANADEM). A rugosidade superior no GLO-30 (15,11 m) em comparação ao ANADEM (14,12 m) é explicada pelo fato de o primeiro incluir vegetação e estruturas antrópicas sobre o terreno, enquanto o segundo, por ser um MDT, apresenta superfície mais regular.

PARAMÊTROS MORFOMÉTRICOS DA DRENAGEM DERIVADOS DOS MDES

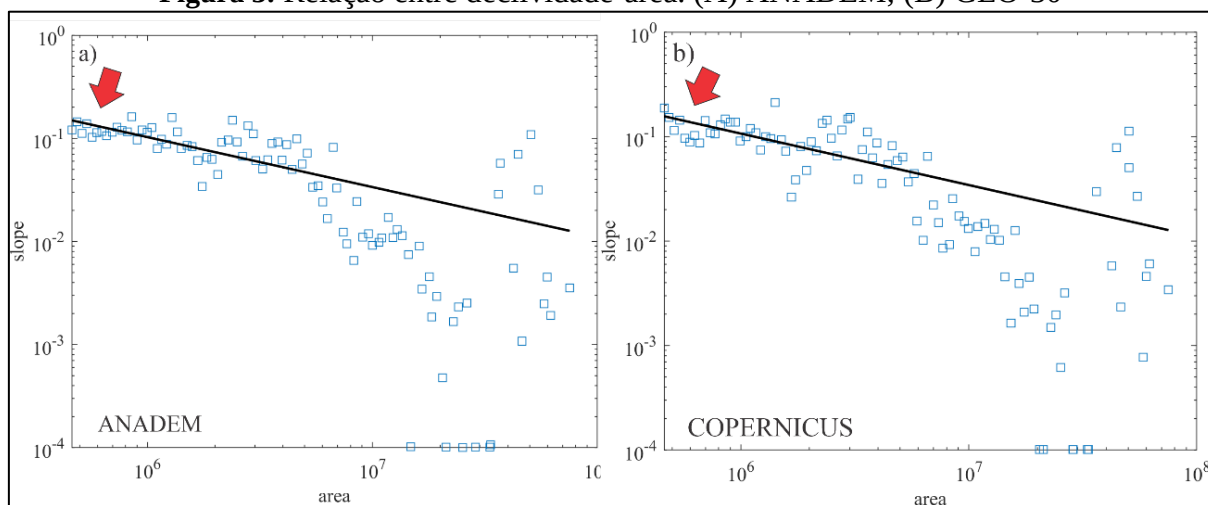
As métricas de drenagem extraídas via *D8* (Tabela 2) indicam diferenças sutis, mas relevantes. A acumulação média de fluxo foi ligeiramente maior no ANADEM (11,77 *pixels*) comparado ao GLO-30 (11,63 *pixels*), sugerindo maior convergência hidrográfica, possivelmente decorrente da remoção de obstáculos superficiais que reredicionam o escoamento e favorecem a continuidade dos canais. A distância média ao exutório foi maior no GLO-30 (7504,1 m) em comparação ao ANADEM (7390,4 m), refletindo sua tendência em representar canais com maior sinuosidade (Tabela 2).

Tabela 2: Parâmetros morfométricos da drenagem médios derivados dos MDEs

Parâmetros Morfométricos	GLO-30	ANADEM	Unidade	Algoritmo
Acumulação de fluxo média	11,634	11,772	número de pixels	<i>D8</i>
Distância média ao exutório	7504,1	7390,4	metros (m)	<i>D8</i>
Ordem média de fluxo (Strahler)	1,685	1,653	adimensional	<i>D8</i>
Relação declividade-área média	11,634	11,772	adimensional	<i>D8</i>
Sinuosidade média da rede	1,1991	1,1837	adimensional	<i>D8</i>

A ordem média de fluxo (Strahler, 1957) é discretamente superior no GLO-30 (1,685) em comparação ao ANADEM (1,653). Esses valores indicam predominância de canais de primeira ordem, com poucos segmentos de ordens superiores, característica típica de cabeceiras de drenagem associadas a áreas montanhosas. A relação declividade-área, levemente superior no ANADEM (11,772), reforça a tendência de canais mais curtos e drenagens mais concentradas no MDT (Figura 3).

Figura 3: Relação entre declividade-área. (A) ANADEM; (B) GLO-30



Fonte: Autores (2025)

A sinuosidade média é maior no Copernicus (1,1991), o que pode refletir o melhor nivelamento do GLO-30 aplicado à áreas de planícies fluviais, favorecido por ajustes que destacam a rede de drenagem mesmo sob influência de zona de matas ciliares. As diferenças observadas neste estudo são coerentes com os resultados de Grande e Rubira (2024), que observaram canais mais longos e sinuosos no GLO-30, em comparação a outros MDEs, em regiões de relevo acidentado e alta densidade vegetal na Serra da Mantiqueira.

INFLUÊNCIA DOS ALGORITMOS DE FLUXO NA ÁREA MÉDIA DE CONTRIBUIÇÃO

As diferentes combinações de algoritmos de fluxo e pré-processamentos resultaram em variações na área média de contribuição (Tabela 3). No caso do *D8*, tanto sem pré-processamento quanto com o método *carve*, os valores permanecem idênticos entre os MDEs, indicando que o esculpimento de canais não alterou o traçado da hidrografia. O preenchimento de depressões (*fill*), por sua vez, aumenta a área de contribuição em ambos os MDEs, com exceção do *D ∞* . Esse aumento decorre do fato de que o preenchimento conecta regiões que anteriormente funcionavam como sumidouros (*sinks*), promovendo maior continuidade do escoamento superficial.

Tabela 3: Área de contribuição média sob diferentes algoritmos e pré-processamentos

Algoritmo de Direção de Fluxo	Pré-processamento	GLO-30	ANADEM
<i>D8</i>	Nenhum	211,72 km ²	210,50 km ²
<i>D8</i>	<i>Carve</i>	211,72 km ²	210,50 km ²
<i>D8</i>	<i>Fill</i>	212,35 km ²	211,39 km ²
<i>D∞</i>	<i>Fill</i>	210,15 km ²	207,89 km ²
<i>MFD</i>	<i>Fill</i>	246,48 km ²	248,73 km ²



O algoritmo D_{∞} , que direciona o fluxo de forma vetorial contínua e permite sua divisão entre, no máximo, dois vizinhos adjacentes, apresentou as menores áreas médias de contribuição (210,15 km² no GLO-30 e 207,89 km² no ANADEM). Esse comportamento ocorre porque, ao dividir o fluxo quando necessário, o D_{∞} reduz a concentração em direções preferenciais, o que diminui a convergência do escoamento e, conseqüentemente, limita a extensão das áreas drenadas.

Por outro lado, o algoritmo *MFD* distribui o fluxo simultaneamente para todos os vizinhos mais baixos, com base na declividade relativa, promovendo uma dispersão mais intensa do escoamento. Esse padrão permite que uma única célula contribua para múltiplas drenagens vizinhas, ampliando o número de *pixels* considerados como área contribuinte. Como resultado, o *MFD* tende a superestimar as áreas de captação, elevando os valores médios de área de contribuição para 246,48 km² no GLO-30 e 248,73 km² no ANADEM.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O GLO-30 apresentou valores médios superiores em variáveis morfométricas do relevo e da drenagem. Tal padrão pode ser atribuído à sua natureza como MDS, que incorpora vegetação e estruturas antrópicas, elevando a rugosidade, bem como a ajustes de nivelamento aplicados ao modelo, que favorecem a continuidade da rede de drenagem mesmo em áreas planas sob influência de matas ciliares.

Quanto aos procedimentos de pré-processamento, o preenchimento de depressões (*fill*) elevou as áreas de contribuição para ambos os MDEs, enquanto o esculpimento de canais (*carve*) não produziu diferenças. O D_{∞} resultou nas menores áreas de contribuição devido à sua abordagem vetorial contínua que dispersa o fluxo em duas direções quando necessário, enquanto o *MFD*, ao distribuir o escoamento para múltiplos vizinhos, superestimou essas áreas, especialmente em terrenos planos. Assim, o algoritmo *D8* com preenchimento apresentou desempenho mais compatível com a morfologia da Serra do Caraça.

O estudo reforça a importância de selecionar criteriosamente o MDE e os métodos de roteamento e correção conforme a paisagem analisada, sobretudo em aplicações que exigem maior precisão na modelagem morfométrica da drenagem.

Palavras-chave: Modelagem; Morfometria; Algoritmos; Roteamento de fluxo; Correção da Drenagem.



AGRADECIMENTOS

Agradecemos o suporte da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por meio da chamada 016/2024 que visa fornecer apoio à participação coletiva em eventos de natureza técnico-científica e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de pós-graduação.

REFERÊNCIAS

AIRBUS. Copernicus Digital Elevation Model – Product Handbook. **Airbus Defence and Space**. 2022.

ALLEN, P. A. From landscapes into geological history. **Nature**, v. 451, n. 7176, p. 274–276, 2008.

AB'SÁBER, A. N. **Os domínios de natureza no Brasil: potencialidades paisagísticas**. São Paulo: Ateliê Editorial, 2003

ARIZA-VILLAYERDE, A. B.; JIMÉNEZ-HORNERO, F. J.; GUTIÉRREZ DE RAVÉ, E. Influence of DEM resolution on drainage network extraction: A multifractal analysis. **Geomorphology**, v. 241, p. 243–254, 2015.

DRĂGUȚ, L.; EISANK, C. Automated object-based classification of topography from SRTM data. **Geomorphology**, v. 141–142, p. 21–33, 2012.

EDDINS, S. Upslope área functions. **MATLAB Central File Exchange**, 2025.

FALORNI, G. et al. Analysis and characterization of the vertical accuracy of digital elevation models from the Shuttle Radar Topography Mission. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 110, n. F2, 2005.

FISHER, P. F.; TATE, N. J. Causes and consequences of error in digital elevation models. **Progress in Physical Geography**, v. 30, n. 4, p. 467-489, 2006.

GAILLETON, B. et al. GraphFlood 1.0: an efficient algorithm to approximate 2D hydrodynamics for landscape evolution models. **Earth Surface Dynamics**, v. 12, n. 6, p. 1295–1313, 25 nov. 2024.

GRANDE, P. F. R.; RUBIRA, F. G. Análise comparativa dos MDEs SRTM, GLO-30 e InSAR: implicações hidrológicas em áreas montanhosas de alta densidade vegetacional. In: XX Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada & Encontro Luso-Afro-Americano de Geografia Física e Ambiente, 2025, João Pessoa. **Anais [...]**. João Pessoa, PB, 2024.

HIRT, C.; FILMER, M. S.; FEATHERSTONE, W. E. 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**, v. 57, n. 3, p. 337–347, 2010.



HOWARD, A. D. Drainage Analysis in Geologic Interpretation: A Summation1. **AAPG Bulletin**, v. 51, n. 11, p. 2246–2259, 1967.

JENSON, S.; DOMINGUE, J. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, p. 1593-1600, 1988.

KÖPPEN, W. Das geographische System der Klimate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (Ed.). **Handbuch der klimatologie**. Berlin: Gebrüder Bornträger, 1936, p. 1-44.

RIZZOLI, P. et al. Relative height error analysis of TanDEM-X elevation data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 73, p. 30–38, set. 2012.

SCHWANGHART, W; KUHN, N. TopoToolbox: A set of Matlab functions for topographic analysis. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, n. 6, p. 770-781, 2010.

SCHWANGHART, W; MOLKENTHIN, C; SCHERLER, D. A systematic approach and software for the analysis of point patterns on river networks. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 46, n. 9, p. 1847-1862, 2021.

SCHWANGHART, W; SCHERLER, D. Bumps in river profiles: uncertainty assessment and smoothing using quantile regression techniques. **Earth Surface Dynamics**, v. 5, n. 4, p. 821 - 839, 2017.

STRAHLER, A. N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Trans. Am. Geophys. Union**, v.38, n.6, p. 913-920, 1957.

STOLLE, A. et al. Protracted River response to medieval earthquakes. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 44, p. 331–341, 2018.

TARBOTON, D. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 33, n. 2, p. 309–319, 1997.

TUCKER, G.; HANCOCK, G. Modelling landscape evolution. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 35, n. 1, p. 28–50, 2010.

WECHSLER, S. P. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: A review. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 4, p. 1481-1500, 2007.

WHIPPLE, K. Bedrock Rivers and the Geomorphology of Active Orogens. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 32, n. 1, p. 151–185, 2004.

WHITTAKER, A. et al. Decoding temporal and spatial patterns of fault uplift using transient river long profiles. **Geomorphology**, v. 100, n. 3-4, p. 506–526, 2008.

WHITTAKER, A.; BOULTON, S. Tectonic and climatic controls on knickpoint retreat rates and landscape response times. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 117, n. F2, 2012.