

# MODELAGENS GEOMORFOLÓGICAS E AMBIENTAIS: AVANÇOS, FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES

*Geomorphological and Environmental Modelling: Advances, Fundamentals, and Applications*

**Felipe Gomes Rubira**

Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), Brasil.

[felipe.rubira@unifal-mg.edu.br](mailto:felipe.rubira@unifal-mg.edu.br)

## Resumo

O artigo discute os avanços recentes em modelagens geomorfológicas e ambientais com suporte de SIG e de outras ferramentas computacionais de análise espacial, que ampliam o potencial de interpretação multiescalar e multitemporal. Abordam-se os fundamentos conceituais e metodológicos, a seleção de dados primários e secundários, os critérios para a escolha de MDEs e os principais procedimentos de condicionamento hidrológico e de suavização de perfis longitudinais. São apresentadas aplicações em modelagens evolutivas da paisagem, voltadas à compreensão da reorganização fluvial, e em modelagens ambientais aplicadas, dedicadas à simulação de inundações, movimentos de massa, erosão e avaliação da geodiversidade e dos riscos naturais. Por fim, discutem-se as limitações, incertezas e implicações éticas da modelagem espacial, ressaltando a importância da calibração, da validação e da prudência interpretativa.

**Palavras-chave:** Modelagem da evolução da paisagem; Modelagem ambiental aplicada; Modelos Digitais de Elevação; Condicionamento hidrológico; Direção de fluxo.

## Abstract

This article discusses recent advances in geomorphological and environmental modelling supported by GIS and other computational tools for spatial analysis, which enhance the multiscale and multitemporal interpretation of landscapes. The study addresses conceptual and methodological foundations, the selection of primary and secondary data, criteria for choosing DEMs, and the main procedures for hydrological conditioning and longitudinal profile smoothing. Applications are presented in landscape evolution modelling, focused on understanding fluvial reorganisation, and in applied environmental modelling, dedicated to simulating floods, mass movements, erosion, and assessing geodiversity and natural hazards. Finally, the paper discusses the limitations, uncertainties, and ethical implications of spatial modelling, emphasising the importance of calibration, validation, and interpretive caution in geomorphological and environmental analysis.

**Keywords:** Landscape evolution modelling; Applied environmental modelling; Digital Elevation Models; Hydrological conditioning; Flow direction.

## 1. INTRODUÇÃO

Modelar é representar uma realidade complexa de forma inteligível. Trata-se de um processo de simplificação e organização da natureza e da sociedade, sobretudo de suas interações. As modelagens podem ser retrospectivas, voltadas à reconstituição de processos passados; diagnósticas, centradas na análise de condições atuais; ou preditivas, destinadas à simulação de cenários futuros com base em dinâmicas observadas (Jakeman; Letcher; Norton, 2006).

No campo das ciências da paisagem, distinguem-se duas dimensões complementares. A primeira, aqui denominada modelagem evolutiva da paisagem, busca compreender mecanismos de longo prazo, como a reorganização da drenagem, a migração de knickpoints e os ajustes de divisores, sob controles tectônicos, litológicos e climáticos (Tucker; Hancock, 2010). A segunda, vinculada às modelagens ambientais aplicadas, concentra-se em fenômenos de curta e média duração, como inundações, deslizamentos, fogo, erosão hídrica e balanço hídrico, que expressam a interação entre processos naturais e ações antrópicas (Bennett *et al.*, 2013). Ambas são interdependentes, pois entender a lógica evolutiva da paisagem é condição para avaliar sua vulnerabilidade atual e para planejar formas sustentáveis de uso e ocupação do território.

Essas modelagens requerem clareza conceitual e metodológica desde o delineamento inicial, orientado por quatro dimensões fundamentais: (i) o fenômeno a ser investigado; (ii) a perspectiva conceitual adotada; (iii) o recorte espacial; e (iv) o recorte temporal. Essas definições direcionam as etapas seguintes, incluindo a seleção de dados e MDEs, os procedimentos de condicionamento hidrológico, a escolha de algoritmos de fluxo e a definição de protocolos de calibração e validação.

Os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) constituem a base da maioria das modelagens geomorfológicas e ambientais. Sua adequação às quatro dimensões delineadas depende do tipo (MDT ou MDS), da resolução espacial, da acurácia vertical, da data de aquisição, da banda do sensor e do nível de processamento. Embora ampliem as possibilidades analíticas, os MDEs e seus derivados reprocessados podem conter ruídos, como sinks, spikes e flats, que exigem condicionamento hidrológico e verificação local. Assim, a interpretação dos resultados requer prudência diante das limitações e incertezas associadas à qualidade dos dados de entrada (Wechsler, 2007).

Todo modelo é uma aproximação sujeita a incertezas e, portanto, demanda calibração, validação e comunicação transparente de pressupostos e limitações. Assim, a comparação com dados de campo e com a literatura especializada é indispensável para aferir a confiabilidade das análises. Neste sentido, a modelagem permite identificar padrões, mas não substitui o pensamento científico, uma vez que a interpretação de resultados requer teoria, hipótese e método. Executar algoritmos sem contexto conceitual conduz a narrativas frágeis e a conclusões enganosas (Oreskes; Shrader-Frechette; Belitz, 1994).

Apesar das limitações, as modelagens configuram ferramentas eficazes de gestão territorial, oferecendo alternativas ágeis e de menor custo para mensurar processos ambientais e diagnosticar vulnerabilidades. Diante do avanço tecnológico e da diversidade de ferramentas disponíveis, negar sua utilidade seria ignorar a capacidade de testar e revisar hipóteses sobre o funcionamento da paisagem e sobre sua interação com a sociedade.

Com base nessas considerações, este artigo objetiva discutir os avanços recentes em modelagens geomorfológicas e ambientais, articulando fundamentos teóricos, técnicos e metodológicos, aplicações práticas e desafios interpretativos. O texto é proveniente da palestra proferida na mesa-redonda “Avanços de SIG em Geomorfologia”, do XV SINAGEO, realizado entre 04 e 09 de agosto de 2025 na cidade de Natal-RN.

## **2. OBTENÇÃO DE DADOS PARA MODELAGENS**

A seleção e a qualidade dos dados são determinantes para a confiabilidade e maior assertividade das modelagens evolutivas da paisagem e das ambientais aplicadas. A pertinência entre as variáveis utilizadas e o fenômeno investigado define o grau de realismo da representação. As fontes de informação dividem-se em dados primários, obtidos em campo ou em laboratório, e dados secundários, provenientes de repositórios institucionais, cuja escolha depende do objetivo e da escala de análise.

Os dados primários asseguram o controle da precisão e do contexto da coleta, sendo essenciais para a calibração e a validação de modelos. Levantamentos altimétricos com estação total, LiDAR e RPAs geram MDEs de alta resolução, adequados à análise de formas sutis e de interações canal-encosta que passam despercebidas em MDEs globais. Essa precisão favorece tanto modelagens evolutivas, voltadas à análise da reorganização da drenagem e da migração de divisores (Cruz et al., 2025), quanto modelagens ambientais aplicadas, como as de suscetibilidade a inundações e de risco de movimentos

de massa (Teng *et al.*, 2017; Vieira *et al.*, 2018). Outras medições diretas incluem e datações que indicam taxas denudacionais por isótopos cosmogênicos e taxas agradacionais por luminescência opticamente estimulada (LOE), fundamentais à compreensão da evolução da paisagem (Zhang *et al.*, 2015; Reed *et al.*, 2023).

Os dados secundários correspondem a informações pré-existent em repositórios como CPRM, IBGE, ANA, EMBRAPA, INPE, USGS, ESA, NASA, entre outros, que disponibilizam registros meteorológicos, fluviométricos, imagens multitemporais de sensores orbitais, mapas geológicos e pedológicos, além de produtos derivados, como o MapBiomas, que monitora o uso da terra no Brasil desde 1985. Esses conjuntos subsidiam tanto modelagens aplicadas ao diagnóstico de riscos, impactos ambientais e respostas hidrológicas a eventos extremos, no contexto das mudanças climáticas, quanto investigações evolutivas em larga escala baseadas em MDEs globais de livre acesso.

### 3. A ESCOLHA DO MDE: PRINCIPAIS CRITÉRIOS E MODELOS GLOBAIS

A escolha de um MDE adequado constitui uma decisão metodológica central em estudos geomorfológicos e em modelagens ambientais (Xiong *et al.*, 2022). Ela deve ser orientada pelas perguntas de pesquisa, pelas escalas espacial e temporal e pelas variáveis analisadas. Os critérios mais relevantes vinculam-se ao tipo de produto, à resolução espacial e vertical, à data de aquisição, ao comprimento de onda do sensor e ao nível de processamento aplicado.

O primeiro aspecto consiste em definir se a modelagem requer um Modelo Digital de Terreno (MDT) ou um Modelo Digital de Superfície (MDS). O MDT representa a superfície nua do terreno, enquanto o MDS inclui a vegetação e as edificações. A utilização de um MDS em análises que demandam MDT pode introduzir vieses e comprometer a interpretação geomorfológica e hidrológica.

A resolução espacial e acurácia vertical determina o nível de detalhe detectável. Produtos globais com resolução de 30 a 90 m, como o SRTM, MERIT DEM, TanDEM-X, ALOS AW3D30, ASTER GDEM V3 e GLO-30, são adequados para análises em escala de bacia, mas suavizam feições menores, como ravinas (Xu *et al.*, 2024). Para investigações locais, especialmente em setores de encosta ou em canais fluviais, são preferíveis MDEs de alta resolução obtidos por LiDAR ou por fotogrametria com RPA. É importante lembrar que a simples reamostragem de um MDE de baixa resolução não aumenta sua

informação altimétrica, como é o caso do AW3D30 (Uemaa *et al.*, 2020; Huang; Hu, 2024).

A data de aquisição do produto também é determinante, pois cada MDE representa a superfície em um momento específico. Em análises voltadas à avaliação de impactos antrópicos no terreno, como obras, mineração ou deposição de aterros, é fundamental que o período de aquisição seja compatível com o intervalo temporal estudado. Nessas situações, recomenda-se o uso de MDEs com datas distintas para representar com maior precisão as condições pré- e pós-impacto (Wu *et al.*, 2020).

O comprimento de onda do sensor interfere na interação do sinal com a cobertura superficial. A maioria dos MDEs utiliza micro-ondas, cujas bandas X, C, S, L e P apresentam penetração crescente. Sensores em banda L, como o AW3D30, tendem a apresentar menor viés vegetacional do que os de bandas C (SRTM) e X (GLO-30), embora o efeito da cobertura não seja totalmente eliminado (Brochado; Rennó, 2024).

A qualidade altimétrica dos MDEs é avaliada por meio de métricas comparativas, sendo o *Root Mean Square Error* (RMSE) a mais empregada (Fisher; Tate, 2006). Essa métrica expressa a discrepância média entre as altitudes modeladas e as observadas por GNSS/RTK ou por LiDAR, permitindo comparar o desempenho entre produtos e estimar o grau de incerteza vertical. Pesquisas indicam que MDEs recentes, como o Copernicus GLO-30, apresentam melhorias significativas em relação a produtos anteriores, como o AW3D30, o ASTER GDEM e o SRTM (Guth; Geoffroy, 2021; Grande e Rubira, 2024).

A preocupação com o viés altimétrico motivou o desenvolvimento de produtos derivados que visam remover a interferência da vegetação e das edificações. O FABDEM (Hawker *et al.*, 2022) e o ANADEM (Laipelt *et al.*, 2024), por exemplo, utilizam algoritmos de aprendizado de máquina calibrados com dados LiDAR para estimar a topografia nua a partir do GLO-30, resultando em uma expressiva redução do viés vertical.

#### 4. CONDICIONAMENTO HIDROLÓGICO E SUAVIZAÇÃO DE PERFIS DE RIOS

Apesar dos avanços em resolução e acurácia, os MDEs frequentemente apresentam artefatos topográficos, como depressões espúrias (*sinks*), picos isolados (*spikes*) e superfícies planas (*flats*), que distorcem a rede de drenagem e comprometem análises morfométricas e hidrológicas. Esses erros decorrem de falhas de interpolação, interferências da vegetação e de edificações ou restrições do sensor, o que torna

indispensável a aplicação de rotinas de condicionamento hidrológico para assegurar a coerência entre a drenagem derivada e a topografia real (Fisher; Tate, 2006).

Neste contexto, exemplificam-se alguns métodos de correção e suavização disponíveis no TopoToolbox (Schwanghart; Scherler, 2014), que atuam em domínios distintos, embora complementares: *fill*, *carve running average* e *constrained regularized smoothing* (CRS). A distinção entre esses métodos é essencial para definir a sequência de processamento e evitar redundâncias (Schwanghart; Scherler, 2017).

O *fill* corrige o grid altimétrico e eleva as cotas das depressões artificiais até o nível mínimo necessário para restabelecer o escoamento descendente. Atua diretamente sobre o *raster* e influencia a estrutura topológica de fluxo, sendo o único capaz de ajustar a altimetria do modelo base. O método *fill* garante um fluxo monotônico rio abaixo, embora possa gerar superfícies planas artificiais e reduzir a rugosidade do terreno. É mais adequado a ambientes montanhosos, onde as depressões espúrias são pontuais e o forte gradiente topográfico minimiza tais efeitos (Schwanghart; Scherler, 2017).

O *carve* corrige a direção de fluxo ao escavar bloqueios no relevo, impondo que nenhuma célula a jusante tenha elevação superior à de seus vizinhos a montante. É aplicado durante o cálculo do fluxo e recomendado para áreas de baixa declividade, como planícies aluviais e costeiras, onde o *fill* poderia gerar superfícies planas desconectadas da morfologia natural (Schwanghart; Scherler, 2017). Deve ser aplicado antes da extração dos perfis longitudinais e não combinado ao *fill*, pois caso o *grid* já tenha sido “preenchido”, o algoritmo de escavação perde sentido e torna-se redundante.

Os métodos *running average* e *CRS* têm finalidades distintas. Não condicionam o MDE nem ajustam a rede de drenagem, mas suavizam as oscilações altimétricas em perfis longitudinais de MDEs brutos ou corrigidos, eliminando o aspecto de “escada”. O *running average* aplica um filtro simples em janelas móveis, atenuando as oscilações de curto comprimento e produzindo perfis mais legíveis. É útil em modelagens regionais voltadas à tendência geral do canal, embora possa eliminar feições reais e introduzir trechos ascendentes artificiais. O *CRS*, por sua vez, combina regressão quantílica com restrições de monotonicidade e curvatura, garantindo perfis suavizados, sem aumento de altitude rio abaixo, e preservando rupturas de declive (Schwanghart; Scherler, 2017).

## 5. ALGORITMOS DE DIREÇÃO DE FLUXO: D8, D<sup>∞</sup> E MFD

A etapa de roteamento do fluxo constitui o elo entre o condicionamento hidrológico do MDE e a extração da rede de drenagem. Corrigir o grid e suavizar os perfis longitudinais não é suficiente. É igualmente necessário compreender o comportamento dos algoritmos, pois cada um representa, de modo distinto, a conectividade e o padrão de escoamento. A escolha influencia diretamente a coerência espacial da drenagem, a delimitação das bacias e as interpretações hidrogeomorfológicas. Nesse contexto, destacam-se alguns dos algoritmos de direção de fluxo disponíveis no TopoToolbox (Schwanghart; Scherler, 2014), baseados em teoria dos grafos e em matrizes esparsas: *Deterministic Eight-neighbors (D8)*, *D-Infinity (D<sup>∞</sup>)* e *Multiple Flow Direction (MFD)*.

No TopoToolbox, a direção de fluxo é definida na criação do objeto *FLOWobj*, que armazena as conexões hidrológicas derivadas do MDE. Nessa etapa, especifica-se o tipo de pré-processamento (*fill*, *carve* ou *none*) e o algoritmo de roteamento (*D8*, *D<sup>∞</sup>* ou *MFD*). Quando não há definição explícita, o método padrão é o *D8*. Os algoritmos *D<sup>∞</sup>* e *MFD*, por sua vez, requerem que o MDE esteja previamente condicionado por *fill*, de modo a eliminar depressões que inviabilizem o cálculo vetorial das direções de escoamento

O *D8*, proposto por Jenson e Domingue (1988), direciona o escoamento para o vizinho de maior declividade entre oito direções fixas (N, NE, E, SE, S, SW, W, NW), codificadas em potências de dois. É determinístico, rápido e de baixo custo computacional, sendo amplamente empregado em modelagens hidrológicas e morfométricas. Contudo, a rigidez direcional pode gerar padrões artificiais e trajetórias angulares em superfícies suaves, reduzindo a naturalidade das redes extraídas.

O *D<sup>∞</sup>*, desenvolvido por Tarboton (1997), aprimora o *D8* ao permitir direções contínuas de fluxo. O algoritmo calcula o vetor de declividade máxima entre as células, permitindo que o escoamento siga qualquer ângulo entre 0° e 360°. Quando o vetor incide entre duas células adjacentes, o fluxo é dividido entre ambas, de acordo com o ângulo de inclinação local. Essa abordagem reduz o viés direcional e representa de forma mais realista o escoamento em encostas suaves e onduladas. Em superfícies planas, contudo, pode produzir direções arbitrárias, exigindo o preenchimento prévio das depressões (*fill*).

O *MFD* proposto por Freeman (1991) distribui o escoamento simultaneamente entre todos os vizinhos descendentes, em proporção à declividade relativa de cada célula. É particularmente eficaz em planícies aluviais e costeiras, onde o escoamento tende a se dispersar lateralmente. Embora reproduza de forma mais realista o comportamento difuso

da água em terrenos planos, o *MFD*, assim como o  $D^\infty$ , não permite a derivação topológica de redes (*STREAMObj*), pois admite múltiplas conexões de saída, o que viola o princípio de hierarquia única exigido para a construção de grafos direcionados acíclicos. Mesmo assim, ambos são úteis para gerar redes rasterizadas e mapas de acumulação de fluxo.

Por fim, destaca-se o *GraphFlood*, proposto por Gailleton *et al.* (2024), que amplia as possibilidades de modelagem hidrológica baseada em MDEs. Diferentemente dos anteriores, que apenas definem o sentido e a proporção do escoamento entre células, o *GraphFlood* simula a propagação bidimensional de volumes hídricos sobre superfícies representadas por grafos direcionados. O modelo calcula a profundidade e a vazão em cada nó da rede, mostrando-se promissor para simulações de inundação.

## 6. OUTRAS FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS DE ANÁLISE ESPACIAL

A crescente complexidade das análises geoambientais e geomorfológicas tem impulsionado o uso combinado de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e de outras ferramentas computacionais de modelagem e análise espacial (Xiong *et al.*, 2022). Essa integração amplia o potencial interpretativo das modelagens, permitindo não apenas o armazenamento e a visualização de dados, mas também a simulação de processos, o reconhecimento de padrões e a previsão de cenários ambientais. A articulação entre diferentes plataformas tem permitido avaliar a resposta das paisagens a perturbações antrópicas e climáticas em múltiplas escalas espaciais e temporais (Hancock *et al.*, 2025).

Entre essas ferramentas, o *Google Earth Engine (GEE)* destaca-se como uma das principais plataformas para o processamento em massa de dados orbitais. Sua estrutura em nuvem, integrada a modelos supervisionados como o *Random Forest*, permite o tratamento de séries históricas e a geração de produtos voltados ao monitoramento ambiental. As aplicações incluem a detecção de mudanças de uso da terra, a análise de processos erosivos, movimentos de massa, queimadas e da dinâmica hidrológica associada a eventos extremos, além da classificação de feições geomorfológicas e do mapeamento de unidades de relevo a partir de imagens multiespectrais (Phan; Kuch; Lehnert, 2020).

Ferramentas de modelagem numérica da paisagem, como o *Landlab* e os *Landscape Evolution Models (LEMs)*, têm sido utilizadas para simular a resposta do relevo e da drenagem a variações tectônicas, climáticas e de nível de base (Barnhart *et*

*al.*, 2025). Baseados em equações diferenciais que descrevem processos de erosão, transporte e deposição, esses modelos permitem reproduzir a evolução topográfica e testar hipóteses sobre a dinâmica de longo termo das paisagens (Zhang *et al.*, 2015; Reed *et al.*, 2023).

Além disso, ferramentas específicas de análise geomorfométrica, como o *TopoToolbox* e o *Topographic Analysis Kit (TAK)*, consolidam-se como complementos aos SIGs convencionais (Schwanghart; Scherler, 2017; Forte; Whipple, 2019). Embora não constituam plataformas completas de geoprocessamento, oferecem rotinas especializadas para a extração de redes de drenagem, o cálculo de gradientes fluviais, a identificação de knickpoints e a caracterização morfométrica de bacias e canais.

## 7. MODELAGENS DE EVOLUÇÃO DA PAISAGEM

Sob a ótica da geomorfologia quantitativa contemporânea, os conceitos de equilíbrio, transitoriedade e persistência têm orientado abordagens de modelagem voltadas à análise dos estados e processos evolutivos das paisagens. Essas modelagens utilizam métricas derivadas de MDEs e de equações de potência de fluxo para investigar a dinâmica erosiva e a reorganização fluvial de longo termo (Whipple *et al.*, 2017).

Essas modelagens investigam o papel dos processos geológicos na transformação do relevo ao longo do tempo. Nessa perspectiva, destacam-se estudos que analisam como as heranças tectônicas e litológicas, as reativações estruturais e a denudação influenciam a eficiência erosiva da drenagem, a estabilidade dos divisores e o equilíbrio dos sistemas fluviais em margens ativas e passivas (Forte; Whipple, 2018; Cruz *et al.*, 2025). A ocorrência de feições associadas à reorganização da drenagem, como *knickpoints*, gargantas fluviais, cotovelos de drenagem, *wind gaps* e baixos divisores, evidencia a transferência de área e os reajustes fluviais (Bishop, 1995).

A partir das contribuições de Kirby e Whipple (2012) e de Perron e Royden (2013), métricas como o *normalized steepness index* ( $k_{sn}$ ) e o *Channel–Hillslope Integration Index* ( $\chi$ ) tornaram-se fundamentais para identificar condições de equilíbrio e desequilíbrio fluvial. O  $k_{sn}$  expressa a energia potencial disponível para a incisão em leito rochoso, ajustando-se à declividade pela área de drenagem. Por sua vez, o  $\chi$  transforma a distância horizontal ao longo do canal em uma coordenada acumulativa que lineariza os perfis longitudinais, facilitando a comparação entre canais e bacias, bem como a

avaliação das condições de equilíbrio fluvial frente a eventos perturbadores e da resistência da rocha à erosão.

Essas métricas originaram os  $\chi$ -plots, nos quais o alinhamento entre canais principais e tributários indica condições de equilíbrio, enquanto desvios indicam perturbações nos níveis de base associadas a forçantes tectônicas ou climáticas (Willett *et al.*, 2014). A abordagem foi ampliada com os  $\chi$ -maps (Willett *et al.*, 2014; Forte; Whipple, 2018), que representam redes fluviais coloridas pelos valores de  $\chi$ . Diferenças desse índice entre os lados opostos de um divisor indicam redistribuição da área de drenagem e sugerem migrações potenciais, em conformidade com a lei das declividades desiguais de Gilbert (1877). Canais com valores de  $\chi$  inferiores aos das bacias adjacentes tendem a capturar áreas devido à sua maior eficiência erosiva.

Essas modelagens têm sido aplicadas com êxito na compreensão da evolução de planaltos e de margens passivas brasileiras. Nessas regiões, as variações na resistência das rochas à erosão modulam a persistência de *knickpoints* e a estabilidade dos divisores, revelando ajustes contínuos das redes hidrográficas ao longo do tempo, mesmo em zonas intraplaca (Cruz *et al.*, 2025)

## 8. MODELAGENS AMBIENTAIS APLICADAS

As modelagens ambientais de natureza aplicada buscam compreender as interações entre ações humanas e sistemas naturais, avaliando situações de conflito, impactos e perigos naturais em escalas temporais curtas e médias, associadas ao tempo histórico da sociedade. Fundamentam-se nos conceitos de suscetibilidade, vulnerabilidade e risco, que orientam a análise de cenários de mudança climática (Gallina *et al.*, 2016). Essas modelagens investigam processos como deslizamentos de massa, inundações, incêndios florestais, erosão hídrica, assoreamento e alterações no balanço hídrico. Tais fenômenos afetam diretamente na morfodinâmica de vertentes e canais fluviais e influenciam a organização territorial das sociedades contemporâneas.

A integração de MDEs, séries temporais e dados climáticos em modelos empíricos e dinâmicos tem aprimorado a capacidade de simular a suscetibilidade a processos de inundação. Modelos hidrológicos e hidráulicos, como HEC-RAS 2D, LISFLOOD-FP, GraphFlood e CaMa-Flood, permitem representar o acúmulo, o transbordamento e a propagação de fluxos superficiais em alta resolução (Teng *et al.*, 2017; Gailleton *et al.*, 2024).

A previsão de deslizamentos e escorregamentos é tradicionalmente realizada por meio de modelos determinísticos e probabilísticos. Entre os mais utilizados, destacam-se o SHALSTAB (Dietrich; Montgomery, 1998) e o TRIGRS (Baum *et al.* 2002), que integram dados topográficos e geotécnicos em modelos hidrológicos acoplados de estabilidade de encostas. Avanços recentes incluem o aprendizado de máquina e calibração com inventários de deslizamentos, gerando mapas de suscetibilidade robustos (Youssef; Pourghasemi, 2021).

A estimativa da perda de solo das vertentes por erosão hídrica é realizada por meio da Equação Universal de Perda de Solo Revisada (RUSLE), implementada em ambientes de SIG. Essa modelagem integra fatores de erosividade da chuva, erodibilidade do solo, topografia, cobertura e manejo do solo e práticas conservacionistas, permitindo estimar taxas potenciais de perda de solo e testar cenários de uso e cobertura da terra (Lense *et al.*, 2023). A integração com séries históricas de uso e cobertura, como as do MapBiomass, permite correlacionar alterações antrópicas com o aumento de processos erosivos.

Modelagens também têm sido aplicadas à avaliação da geodiversidade e de suas relações com a biodiversidade. Métricas de relevo, litologia e drenagem são combinadas para gerar índices de geodiversidade, que orientam estratégias de conservação, gestão ambiental e geoturismo (Tukiainen; Toivanen; Maliniemi, 2022). Em paralelo, modelos integrados de perigo e vulnerabilidade ambiental vêm sendo empregados para delimitar zonas de risco associadas a desastres naturais e à intensificação de eventos extremos decorrentes das mudanças climáticas (Forzieri *et al.*, 2018).

## 9. LIMITES, INCERTEZAS E ÉTICA INTERPRETATIVA

O avanço das geotecnologias não elimina as limitações dos dados e dos modelos. Cada produto, seja um MDE, uma série temporal ou um índice derivado, contém incertezas associadas à resolução, à interpolação e às interferências de superfície. Reconhecer e comunicar essas incertezas é parte fundamental da prática científica (Warmink *et al.*, 2010).

Modelos espaciais são aproximações e, portanto, exigem validação rigorosa. A comparação com dados de campo, medições *in situ*, registros de estações fluviométricas ou informações da Defesa Civil é indispensável para aferir a confiabilidade das análises. A responsabilidade interpretativa implica confrontar os resultados gerados com evidências empíricas e com o conhecimento consolidado na literatura especializada. Modelar não é

sinônimo de provar, pois interpretações não validadas podem levar a erros consideráveis e a conclusões enganosas (Oreskes; Shrader-Frechette; Belitz, 1994).

Portanto, o SIG e as demais ferramentas computacionais devem ser compreendidas como instrumentos de investigação, e não como substitutos do raciocínio científico. Ferramentas automatizadas não produzem ciência por si mesmas, apenas potencializam a capacidade analítica do pesquisador (Nelson *et al.*, 2024). Resultados derivados de operações automáticas, sem fundamentação teórica ou validação empírica, podem gerar narrativas visualmente convincentes, mas conceitual e estatisticamente frágeis. Assim, a tríade que integra teoria, método e observação de campo constitui o principal pilar das modelagens da evolução da paisagem e das ambientais de natureza aplicada.

## 10. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo discutiu as etapas e os desafios envolvidos na modelagem geomorfológica e ambiental com o suporte de ferramentas computacionais. O avanço na resolução dos MDEs, na eficiência dos algoritmos e na interoperabilidade entre plataformas tem ampliado o alcance analítico dessas modelagens, mas também exige maior rigor metodológico e responsabilidade interpretativa.

A integração entre SIGs, *TopoToolbox*, *TAK*, *Landlab*, *GEE* e algoritmos de aprendizado de máquina, como o *Random Forest*, tem possibilitado análises multiescalares e multitemporais, conectando processos pretéritos, dinâmicas atuais e projeções futuras.

A definição prévia das perguntas de pesquisa, do fenômeno analisado, dos conceitos orientadores e das escalas espaciais e temporais de análise é condição essencial para garantir coerência entre objetivos, resultados e métodos das modelagens.

A escolha do MDE deve ser compatível com o propósito do estudo, e comparações entre produtos globais são recomendadas para avaliar sua adequação. Em análises baseadas em drenagem derivada de MDEs, o condicionamento hidrológico (*fill*, *carve*) e a suavização de perfis longitudinais (*running average*, *CRS*) devem ser aplicados de forma criteriosa e documentada, assegurando reprodutibilidade. A seleção do algoritmo de direção de fluxo deve considerar o contexto geomorfológico: *D8* em áreas íngremes, *D<sup>∞</sup>* em relevos suaves e *MFD* em planícies aluviais.

Por fim, reforça-se que a calibração e validação dos modelos, bem como a explicitação das incertezas, constituem parte essencial da boa prática científica e da honestidade intelectual. Ferramentas computacionais devem ser compreendidas como meios de investigação, e não como um fim em si.

## REFERÊNCIAS

- BARNHART, K. R.; HUTTON, E. W. H.; TUCKER, G. E.; GASPARINI, N. M.; ISTANBULLUOGLU, E.; HOBLEY, D. E. J.; LYONS, N. J.; MOUCHE, M.; NUDURUPATI, S. S.; ADAMS, J. M.; BANDARAGODA, C. Short communication: Landlab v2.0: a software package for Earth surface dynamics. **Earth Surf. Dynam.**, v. 8, p. 379–397, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/esurf-8-379-2020>.
- BAUM, R.L.; SAVAGE, W.Z.; GODT, J.W. TRIGRS - a Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis, version 2.0: **U.S. Geological Survey Open-File Report**, 2008. 75p.
- BENNETT, N. D.; CROKE, B. F. W.; GUARISO, G.; GUILLAUME, J. H. A.; HAMILTON, S. H.; JAKEMAN, A. J.; MARSILI-LIBELLI, S.; NEWHAM, L. T. H.; NORTON, J. P.; PERRIN, C.; PIERCE, S. A.; ROBSON, B.; SEPPELT, R.; VOINOV, A. A.; FATH, B. D.; ANDREASSIAN, V. Characterising performance of environmental models. **Environmental Modelling & Software**, v. 40, p. 1–20, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.09.011>.
- BISHOP, P. Long-term landscape evolution: linking tectonics and surface processes. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 32, p. 329-365, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.1493>.
- BROCHADO, G. T.; RENNÓ, C. D. New Method to Correct Vegetation Bias in a Copernicus Digital Elevation Model to Improve Flow Path Delineation. **Remote Sens.** 2024, v. 16, 4332, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16224332>.
- CRUZ, B. L.; ARCHANJO, R. E. S.; SILVA, R. V. M. A.; SANTANA, D. B.; RIOS, G. S.; MOREIRA, V. B.; OLIVEIRA, T. A.; FERNANDES, N. F.; MINCATO, R. L.; RUBIRA, F. G. Reorganization of the drainage network based on morphostructural controls in passive margins. **Geomorphology**, v. 478, p. 109693, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2025.109693>.
- DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement) **Technical Report**, 1998. 29p.
- FISHER, P. F.; TATE, N. J. Causes and consequences of error in digital elevation models. **Progress in Physical Geography: Earth and Environment**, v. 30, n. 4, p. 467-489, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1191/0309133306pp492ra>.
- FORTE, A. M.; WHIPPLE, K. X. Criteria and tools for determining drainage divide stability. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 493, p. 102–117, 2018.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2018.04.026>.

FORTE, A. M.; WHIPPLE, K. X. Short communication: The Topographic Analysis Kit (TAK) for TopoToolbox. **Earth Surface Dynamics**, v. 7, p. 87–95, 2019.

DOI: <https://doi.org/10.5194/esurf-7-87-2019>.

FORZIERI, G.; BIANCHI, A.; SILVA, F. B. e; MARIN HERRERA, M. A.; LEBLOIS, A.; LAVALLE, C.; AERTS, J. C. J. H.; FEYEN, L. Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. **Global Environmental Change**, v. 48, p. 97–107, 2018.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.11.007>.

FREEMAN, T. G. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. **Computers & Geosciences**, v. 17, n. 3, p. 413–422, 1991.

DOI: [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(91\)90048-l](https://doi.org/10.1016/0098-3004(91)90048-l).

GAILLETON, B.; STEER, P.; DAVY, P.; SCHWANGHART, W.; BERNARD, T. GraphFlood 1.0: an efficient algorithm to approximate 2D hydrodynamics for landscape evolution models. **Earth Surface Dynamics**, v. 12, p. 1295–1313, 2024.

DOI: <https://doi.org/10.5194/esurf-12-1295-2024>.

GALLINA, V.; TORRESAN, S.; CRITTO, A.; SPEROTTO, A.; GLADE, T.; MARCOMINI, A. A review of multi-risk methodologies for natural hazards: consequences and challenges for a climate change impact assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 168, p. 123–132, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.11.011>.

GILBERT, G. K. Geology of the Henry Mountains. **Monograph**. Washington, 1877.

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: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 20., 2024, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa: [s.n.], 2024. p. 1–8.

GUTH, P. L.; GEOFFROY, T. M. LiDAR point cloud and ICESat-2 evaluation of 1 second global digital elevation models: Copernicus wins. **Transactions in GIS**, v. 25, p. 2245–2261, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/tgis.12825>.

HANCOCK, G.; DUQUE, J. F. M.; WELIVITIYA, W. D. D. P. A new way to geoengineer landscapes using computer-based landform evolution models. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 50, n. 13, e70161, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.70161>.

HAWKER, L.; UHE, P.; PAULO, L.; SOSA, J.; SAVAGE, J.; SAMPSON, C.; NEAL, J. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed. **Environmental Research Letters**, v. 17, n. 2, p. 024016, 2022.

HUANG, J.; YU, Y. Vertical Accuracy Assessment of the ASTER, SRTM, GLO-30, and ATLAS in a Forested Environment. **Forests**, v. 15, n. 426, 2024.

DOI: <https://doi.org/10.3390/f15030426>.

LENSE, G. H. E.; LÄMMLE, L.; AYER, J. E. B.; LAMA, G. F. C.; RUBIRA, F. G.; MINCATO, R. L. Modeling of soil loss by water erosion and its impacts on the Cantareira System, Brazil. **Water**, v. 15, p. 1490, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15081490>.

JAKEMAN, A. J.; LETCHER, R. A.; NORTON, J. P. Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. **Environmental Modelling & Software**, v. 21, n. 5, p. 602–614, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.01.004>.

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

KIRBY, E.; WHIPPLE, K. X. Expression of active tectonics in erosional landscapes. **Journal of Structural Geology**, v. 44, p. 54–75, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.07.009>.

LAIPELT, L.; COMINI DE ANDRADE, B.; COLLISCHONN, W.; TEIXEIRA, A. A.; PAIVA, R. C. D. D.; RUHOFF, A. ANADEM: A Digital Terrain Model for South America. **Remote Sensing**, v. 16, 2321, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16132321>.

NELSON, T.; FRAZIER, A. E.; KEDRON, P.; DODGE, S.; ZHAO, B.; GOODCHILD, M.; WILSON, J. A research agenda for GIScience in a time of disruptions. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 39, n. 1, p. 1–24, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/13658816.2024.2405191>.

ORESQUES, N.; SHRADER-FRECHETTE, K.; BELITZ, K. Verification, validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. **Science**, v. 263, n.5147, p. 641–646, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.263.5147.641>.

PHAN, T. N.; KUCH, V.; LEHNERT, L. W. Land Cover Classification using Google Earth Engine and Random Forest Classifier—The Role of Image Composition. **Remote Sens.** **2020**, v. 12, 2411, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12152411>.

PERRON, J. T.; ROYDEN, L. An integral approach to bedrock river profile analysis. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, p. 570–576, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.3302>.

REED, M. M.; FERRIER, K. L.; PERRON, J. T. Modeling cosmogenic nuclides in transiently evolving topography and chemically weathering soils. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 128, p. e2023JF007201, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1029/2023JF007201>.

SCHWANGHART, W.; SCHERLER, D. Short Communication: TopoToolbox 2 – MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences. **Earth Surface Dynamics**, v. 2, p. 1–7, 2014. DOI: <https://doi.org/10.5194/esurf-2-1-2014>.

SCHWANGHART, W.; SCHERLER, D. Bumps in river profiles: uncertainty assessment and smoothing using quantile regression techniques. **Earth Surface Dynamics**, v. 5, p. 821–839, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5194/esurf-5-821-2017>.

TARBOTON, D. G. 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. DOI: <https://doi.org/10.1029/96WR03137>.

TENG, J.; JAKEMAN, A. J.; VAZE, J.; CROKE, B. F. W.; DUTTA, D.; KIM, S. Flood inundation modelling: a review of methods, recent advances and uncertainty analysis. **Environmental Modelling & Software**, v. 90, p. 201–216, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.01.006>.

TUCKER, G. E.; HANCOCK, G. R. Modelling landscape evolution. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 35, p. 28–50, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/esp.1952>.

TUKIAINEN, H.; TOIVANEN, M.; MALINIEMI, T. Geodiversity and biodiversity. **Geological Society, London, Special Publications**, v. 530, p. 31–47, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1144/SP530-2022-107>.

UUEMAA, E.; AHI, S.; MONTIBELLER, B.; MURU, M.; KMOCH, A. Vertical accuracy of freely available global digital elevation models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASADEM). **Remote Sensing**, v. 12, 3482, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12213482>.

VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F.; AUGUSTO FILHO, O.; MARTINS, T. D.; MONTGOMERY, D. R. Assessing shallow landslide hazards using the TRIGRS and SHALSTAB models, Serra do Mar, Brazil. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, 260, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7436-0>.

WARMINK, J. J.; JANSSEN, J. A. E. B.; BOOIJ, M. J.; KROL, M. S. Identification and classification of uncertainties in the application of environmental models. **Environmental Modelling & Software**, v. 25, p. 1518–1527, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.04.011>.

WECHSLER, S. P. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, p. 1481–1500, 2007. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-11-1481-2007>.

WHIPPLE, K. X.; FORTE, A. M.; DIBIASE, R. A.; GASPARINI, N. M.; OUIMET, W. B. Timescales of landscape response to divide migration and drainage capture: implications for the role of divide mobility in landscape evolution. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 122, p. 248–273, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/2016JF003973>.

WILLETT, S. D.; MCCOY, S. W.; PERRON, J. T.; GOREN, L.; CHEN, C. Dynamic reorganization of river basins. **Science**, v. 343, 1248765, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1126/science.1248765>.

WU, Q.; SONG, C.; LIU, K.; KE, L. Integration of TanDEM-X and SRTM DEMs and spectral imagery to improve the large-scale detection of opencast mining areas. **Remote Sensing**, v. 12, 1451, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs12091451>.

XIONG, L.; LI, S.; TANG, G.; STROBL, J. Geomorphometry and terrain analysis: data, methods, platforms and applications. **Earth-Science Reviews**, v. 233, 104191, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104191>.

XU, W.; LI, J.; PENG, D.; YIN, H.; JIANG, J.; XIA, H.; WEN, D. Vertical accuracy assessment and improvement of five high-resolution open-source digital elevation models using ICESat-2 data and Random Forest: case study on Chongqing, China. **Remote Sensing**, v. 16, 1903, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs16111903>.

YOUSSEF, A. M.; POURGHASEMI, H. R. Landslide susceptibility mapping using machine learning algorithms and comparison of their performance at Abha Basin, Asir Region, Saudi Arabia. **Geoscience Frontiers**, v. 12, p. 639–655, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.05.010>.

ZHANG, D.; WANG, G.; PULLEN, A.; ABELL, J. T.; JI, J.; SHEN, T. Landscape evolution and development of eolian-modified unconsolidated gravel surfaces and yardangs in the Hami Basin, China. **Geomorphology**, v. 368, 107355, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107355>.