

GERAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO: UMA COMPARAÇÃO ENTRE AS FERRAMENTAS DE INTERPOLAÇÃO TIN E TOPO TO RASTER¹

Gustavo Soares Arrial¹, Romario Trentin²

(1 – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Programa de Pós-graduação em Geografia, gustavo.arrial@acad.ufsm.br, <https://orcid.org/0000-0002-8436-7533>; 2 – Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Campus Camobi, Instituto de Geociências, romariotrentin@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-0615-2801>)

Resumo: O artigo tem como objetivo comparar o desempenho dos métodos de interpolação TIN (Triangulated Irregular Network) e Topo to Raster na geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) em bacias hidrográficas. Para isso, foram utilizados dados vetoriais de curvas de nível, cursos d’água e pontos cotados da área de estudo, as bacias hidrográficas dos rios Toropi e Ibicuí-Mirim. Foram gerados MDEs com resolução espacial de 20 metros, e os resultados foram analisados por meio de parâmetros geomorfométricos, como declividade, aspecto e perfil. Os resultados indicam que o método Topo to Raster é mais adequado para áreas planas e suavemente onduladas, enquanto o TIN apresenta melhor desempenho em regiões de alta declividade. Conclui-se que a escolha do método de interpolação deve levar em conta a topografia da área de estudo e o nível de detalhamento desejado, sendo o Topo to Raster mais preciso em contextos hidrológicos e o TIN mais eficiente em áreas com maior variação altimétrica e densidade de nuvem de pontos.

Palavras-Chave: Bacia hidrográfica; Geomorfometria; Modelagem

¹ Artigo recebido para publicação em 29 de abril de 2025

Artigo aprovado para publicação em 08 de dezembro de 2025

**GENERATION OF DIGITAL ELEVATION MODELS: A COMPARISON BETWEEN
THE TIN AND TOPO TO RASTER INTERPOLATION TOOLS.**

Abstract: The article aims to compare the performance of the TIN (Triangulated Irregular Network) and Topo to Raster interpolation methods in generating Digital Elevation Models (DEM) in river basins. For this, vector data from contour, stream and elevation points in the study area, the Toropi and Ibicuí-Mirim river basins. DEMs were generated with a spatial resolution of 20 meters, and the results were analyzed using geomorphometric parameters, such as slope, aspect and profile. The results indicate that the Topo to Raster method is more suitable for flat and wavy relief areas, while the TIN performs better in regions with high slopes. It is concluded that the choice of interpolation method must take into account the topography of the study area and the desired level of detail, with Topo to Raster being more accurate in hydrological contexts and TIN being more efficient in areas with greater altimetric variation and dense point cloud.

Keyword: River basin; Geomorphometry; Modelling.

**GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN: UNA
COMPARACIÓN ENTRE LAS HERRAMIENTAS DE INTERPOLACIÓN TIN Y
TOPO TO RASTER**

Resumen: El artículo tiene como objetivo comparar el rendimiento de los métodos de interpolación TIN (Triangulated Irregular Network) y Topo to Raster en la generación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) en cuencas hidrográficas. Para ello, se utilizaron datos vectoriales de curvas de nivel, cursos de agua y puntos cotados del área de estudio, las cuencas hidrográficas de los ríos Toropi e Ibicuí-Mirim. Se generaron MDEs con resolución espacial de 20 metros, y los resultados fueron analizados mediante parámetros geomorfométricos, como pendiente, aspecto y perfil. Los resultados indican que el método Topo to Raster es más adecuado para áreas planas y suavemente onduladas, mientras que el TIN presenta un mejor rendimiento en regiones de alta pendiente. Se concluye que la elección

del método de interpolación debe tener en cuenta la topografía del área de estudio y el nivel de detalle deseado, siendo el Topo to Raster más preciso en contextos hidrológicos y el TIN más eficiente en áreas con mayor variación altimétrica y densidad de nube de puntos.

Palabras Clave: Cuenca hidrográfica; Geomorfometría; Modelado.

Introdução

A geomorfometria, também conhecida como Modelagem, Parametrização ou Análise da superfície terrestre, é um campo interdisciplinar que evoluiu a partir das geociências, matemática e, mais recentemente, das ciências da computação (PIKE; EVANS; HENGL, 2009). Suas aplicações abrangem áreas como a hidrogeomorfologia, pedologia, desastres naturais, oceanografia, ecologia (PIKE, 2000) e planejamento ambiental (CAPOANE; TROIAN, 2018).

Segundo Pike; Evans; Hengl, a geomorfometria pode ser definida como “[...] a ciência da quantificação topográfica” (2009, p. 4). Seu foco está na extração de parâmetros e objetos da superfície terrestre a partir de Modelos Digitais de Elevação (MDE) (Pike; Evans; Hengl, 2009). E costuma ser considerada como uma das áreas mais exatas da geomorfologia (MINÁR; MINÁR JR.; EVANS, 2015), “[...] ciência que tem por objetivo analisar as formas do relevo, buscando compreender as relações processuais pretéritas e atuais.” (CASSETI, 1994, p. 11). A geomorfologia é de suma importância na geografia como subsídio ao entendimento dos processos de apropriação do relevo (CASSETI, 1994).

Os MDE são representações tridimensionais da superfície terrestre (GOMES; ZAIDAN; ROCHA, 2022). De fundamental importância para a representação e interpretação do território, permitem análises como declividade, aspecto (AGUILAR; FLAIN; COELHO, 2018), hipsometria, orientação de vertentes e acúmulo de fluxos (GOMES; ZAIDAN; ROCHA, 2022). Sendo também fundamentais para a interpretação do condicionamento do relevo sobre o arranjo tectono-estrutural de uma região, como pela extração de lineamentos a partir de um MDE, onde, “[...] após aplicação das iluminações artificiais, as zonas de descontinuidades da crosta (fraturas) ficam mais destacáveis e visíveis na imagem”.

(BRICALLI, 2016, p. 82), esses são apenas alguns exemplos da ampla aplicabilidade dos MDEs nas mais variadas áreas do conhecimento.

Parâmetros da superfície terrestre são uma medida descritiva da superfície terrestre, a exemplo da declividade e aspecto, enquanto objetos da superfície terrestre são formas espaciais discretas, como aluviões e cursos de água (PIKE; EVANS; HENGL, 2009). O primeiro é, geralmente, melhor representado a partir de uma superfície matricial, enquanto o segundo é representado por malha vetorial: pontos, linhas ou polígonos (PIKE; EVANS; HENGL, 2009).

Uma forma de gerar MDE é a partir da interpolação de pontos onde a informação de altitude é conhecida, visando distinguir a elevação de áreas onde não há essa informação. Na interpolação TIN (Triangulated Irregular Network) é possível a criação de uma superfície formada por triângulos (Open Source Geospatial Foundation, 2023) a partir da triangulação entre os pontos (AGUILAR; FLAIN; COELHO, 2018). Esse método é mais eficiente na representação de mudanças discretas na superfície terrestre, entretanto pode ser ilusória em áreas mais suaves (HENGL; EVANS, 2009). Ou também pelo algoritmo Topo To Raster (TtR), desenvolvido por Hutchinson (1989), é um método de interpolação desenhado especificamente para a modelagem de MDE hidrologicamente corretos (Environmental Systems Research Institute, 2021). Ou seja, onde os cursos d'água são considerados na modelagem, a fim de obter um MDE mais próximo da realidade.

Outra forma de gerar Modelos Digitais de Elevação é a partir do método de interferometria SAR (Radar de Abertura Sintética), como foi realizado na Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), em 2000. Onde, em um ônibus espacial, foram instaladas duas antenas SAR a uma distância de 60 metros, equipadas com radares SAR para coletar sinais simultaneamente e em ângulos com diferença mínima. Essas diferenças entre os sinais permitiram o cálculo da elevação da superfície terrestre, mapeando assim, a quase totalidade do planeta Terra numa resolução de 1 arco de segundo, aproximadamente 30 metros (USGS, 2018). No caso do presente trabalho, dados de elevação deste modelo foram utilizados para comparações em perfis topográficos específicos.

Análises geomorfométricas podem ser realizadas através de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e aplicadas em bacias hidrográficas (BH). Uma unidade ambiental muito importante no estudo do relevo, pois delimita e engloba tanto elementos do meio físico, como geologia, geomorfologia e pedologia, como elementos do meio socioeconômico, como uso e ocupação da terra e organização espacial dos grupos sociais ali presentes. E pode ser definida como um “Conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes” (GUERRA, 1993, p. 48).

Este artigo tem como objetivo comparar o desempenho dos métodos de interpolação TIN e TtR na geração de Modelos Digitais de Elevação em bacias hidrográficas. A partir de arquivos vetoriais de cartas topográficas na escala 1:50.000, provenientes do Banco de Dados Geográficos do Exército (BDGEx), e a análise dos produtos derivados dos MDEs resultantes e contribuir para a escolha de técnicas mais adequadas em estudos de geoprocessamento.

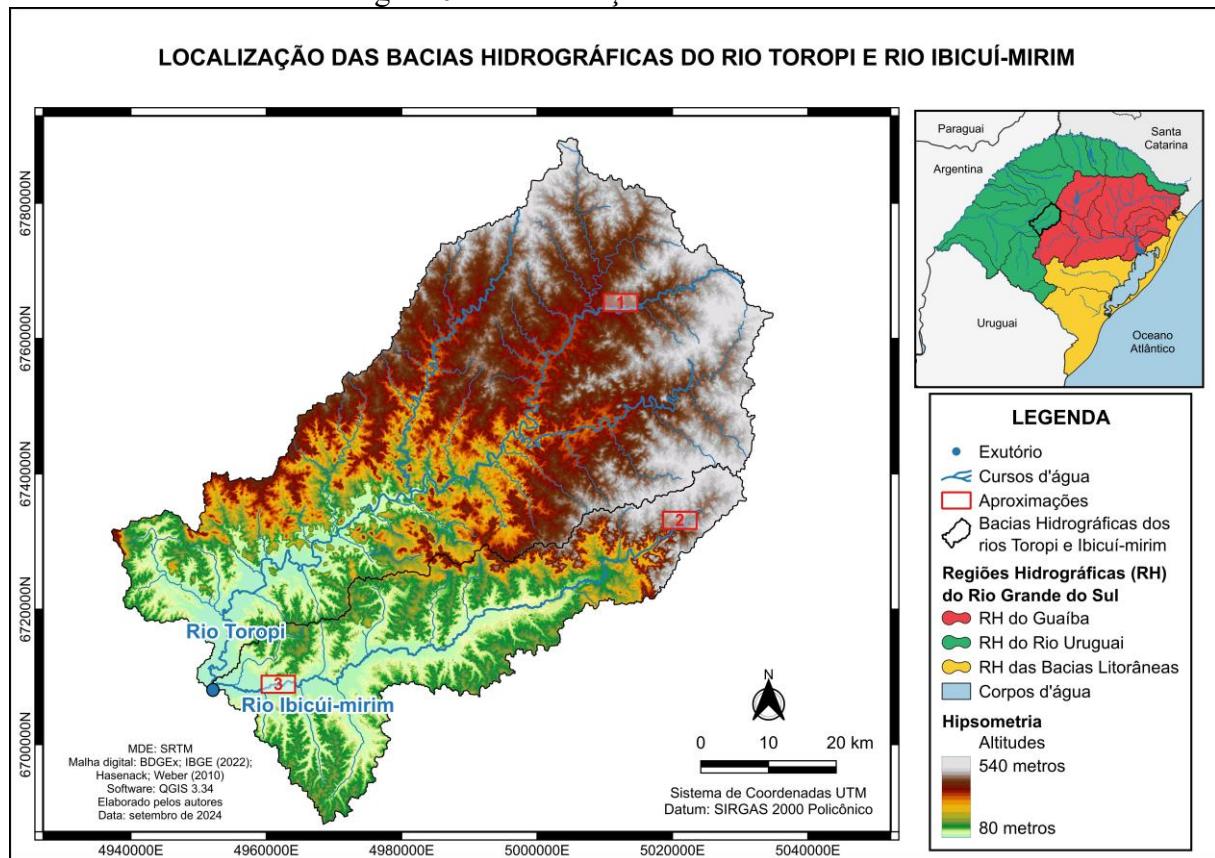
Vale ressaltar que, a opção pela comparação entre o TIN e TtR e pelos dados vetoriais do BDGEx, em detrimento de produtos de radar, como o Sentinel-1, que permitiriam a geração de MDE de maior resolução, deve-se principalmente à natureza metodológica do estudo, que visa comparar a performance de algoritmos de interpolação a partir de dados primários de elevação de fácil acesso e com métodos mais simples que a interferometria. Além de manter uma adequabilidade com a escala de análise (bacias hidrográficas) e a reproduzibilidade do método em regiões com disponibilidade limitada de dados de alta resolução.

A área de estudo (Figura 01) do presente trabalho é a área da bacia hidrográfica do rio Toropi (BHRT) e rio Ibicuí-mirim (BHIM), importantes afluentes do rio Ibicuí, um dos maiores rios do Rio Grande do Sul e que faz parte da Região Hidrográfica do rio Uruguai. Inseridas na transição entre o Planalto das Araucárias e a Depressão Central, são cobertas pelos biomas Pampa e Mata Atlântica, além de suas áreas de transição, e abrange parte do território de 14 municípios do centro-oeste gaúcho.

Essa área de estudo é relevante para o objetivo deste trabalho, pois apresenta uma grande amplitude altimétrica e diversidade geomorfológica, o que permite uma análise

diversificada de como os MDEs se comportam em diferentes formas do relevo, e pode proporcionar a obtenção de resultados aplicáveis em diversas áreas, como geografia, geomorfologia, hidrologia e outros campos relacionados.

Figura 01 - Localização da área de estudo



Materiais e Métodos

Para a geração dos Modelos Digitais de Elevação foram utilizadas duas metodologias de interpolação, o método TIN e o TopoToRaster, nos softwares QGIS 3.34 (Open Source Geospatial Foundation) e ArcMap 10.3 (Environmental Systems Research Institute), respectivamente. A partir dos dados vetoriais georreferenciados de curvas de nível com equidistância de 20 metros, cursos d'água e pontos cotados, na escala 1:50.000, provenientes de 15 cartas topográficas da área de estudo (Quadro 01), obtidas através do BDGEx.

Quadro 1 - Relação das cartas topográficas utilizadas

Nome da carta	Nomenclatura	Nome da carta	Nomenclatura
Camobi	SH-22-V-C-IV-2	Santa Luzia	SH-21-X-D-III-2
Catuçaba	SH-21-X-D-VI-4	Santa Maria	SH-22-V-C-IV-1
Coxilha do Pau Fincado	SH-21-X-D-VI-3	São Pedro do Sul	SH-21-X-D-VI-2
Jaguari	SH-21-X-D-II-4	São Vicente do Sul	SH-21-X-D-V-2
Júlio de Castilhos	SH-22-V-C-I-2	Tupanciretã	SH-22-V-C-I-1
Mata	SH-21-X-D-VI-1	Val de Serra	SH-22-V-C-I-4
Quevedos	SH-21-X-D-III-4	Vinte Tiros	SH-21-X-D-III-3
Rio Guassupi	SH-22-V-C-I-3		-

Fonte: BDGEx (2023). Organizado pelos autores (2024)

Primeiramente, no QGIS os dados vetoriais foram organizados e mesclados conforme articulação das cartas topográficas. Posteriormente foi realizada a correção de erros de geometria, devido a descontinuidades nos arquivos vetoriais lineares (curvas de nível e cursos d’água) nas áreas onde as cartas topográficas são articuladas (Figura 02). Então, após a identificação da localização dos erros geométricos, foi utilizada a ferramenta de vértice e de aderência para fazer a “ligação” das estruturas lineares, com base nas estruturas vizinhas, em imagens do Google Satellite e Open Topo Map e das próprias cartas topográficas (Figura 03).

Após a correção dos dados, foram realizadas as interpolações. Primeiramente, através do programa QGIS, foi empregada a ferramenta Interpolação TIN, com a utilização dos arquivos vetoriais de curvas de nível e pontos cotados. As curvas de nível foram classificadas como estruturas lineares e os pontos cotados como pontos de elevação, em ambos os arquivos foi utilizada a coluna “cota” como atributo de interpolação.

Já no programa ArcMap, foi empregada a ferramenta Topo to Raster, e os arquivos vetoriais de curvas de nível, cursos d’água e pontos cotados. As curvas de nível foram classificadas como *contour*, os cursos d’água como *stream* e os pontos cotados como

elevation points. A coluna “cota” também foi utilizada como atributo de interpolação nos arquivos de curvas de nível e pontos cotados.

Figura 2: Descontinuidade na articulação de cartas topográficas

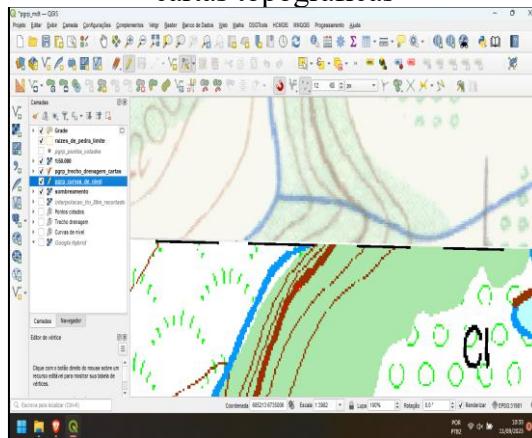
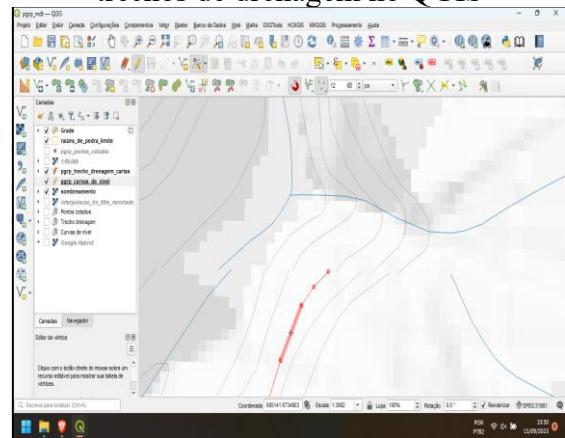


Figura 3: Correção de curvas de nível e trechos de drenagem no QGIS



Fonte: BDGEx. Organizado pelos autores (2023)

Em ambos os métodos foi gerado um arquivo matricial com 20 metros de resolução espacial, com a elevação de toda a área das bacias hidrográficas.

Para a comparação dos MDE resultantes, foram gerados e comparados parâmetros da superfície terrestre de declividade, aspecto, curvatura (plano e perfil), orientação de vertentes e hidrografia a partir de ambas as interpolações, pela ferramenta Grass r.slope.aspect no QGIS. Os valores estatísticos dos parâmetros foram comparados a partir da avaliação de perfis de elevação em diversos segmentos da área de estudo.

Foram delimitados perfis de elevação para demonstrar a variação altimétrica ao longo de uma seção transversal e facilitar a visualização de diferenças entre os MDEs, onde um MDE SRTM com resolução espacial de 30 metros foi utilizado como base. Foram escolhidas três áreas distintas da área de estudo, sendo elas: uma área de altas altitudes da BHRT, uma área de nascentes da BHIM e uma área plana, levemente ondulada, próxima à confluência entre os dois rios principais.

Os perfis de elevação satisfizeram os critérios de: perpassar por pelo menos dois cursos d'água, um comprimento de aproximadamente dois quilômetros e abranger áreas onde era possível notar uma diferença de elevação entre os MDEs apenas pela simbologia. Uma observação é que não foi possível padronizar a escala dos perfis de elevação, portanto uma diferença de, por exemplo, 5 metros podem parecer maior em um perfil do que em outro, isso deve ser levado em consideração para uma correta leitura dos mesmos.

Resultados e Discussão

A primeira comparação foi entre os valores mínimos, máximos e médios de diferentes parâmetros (Tabela 1) gerados a partir dos MDEs interpolados. Dos seis parâmetros analisados, apenas dois retornaram valores mínimos de maior discrepância, perfil e plano de curvatura, quatro de valores máximo, declividade, direção de fluxo, perfil e plano de curvatura, e nos médios, apenas o aspecto divergiu entre os interpoladores. É importante ressaltar que, segundo Hofierka et al. (2009), parâmetros da superfície terrestre, em especial curvaturas baseadas em derivadas de segunda ordem, são muito sensíveis a processos de interpolação.

Tabela 1 - Valores estatísticos dos parâmetros

Parâmetro/Mérito	Vmin		Vmáx		Média	
	TtR	TIN	TtR	TIN	TtR	TIN
Aspecto	-1	-1	358,6	358,6	179,6	115,3
Declividade	0	0	109,9	243,3	8,3	6,9
Direção de fluxo	1	1	192	255	31,3	27,4
Hipsometria	81,6	88	547	540	291,9	292,7
Perfil de curvatura	-4,1	-17,3	5	13,4	-0,05	0,1
Plano de curvatura	-4,41	-8,9	4,1	10,1	-0,05	0,05

Elaborado pelos autores (2024)

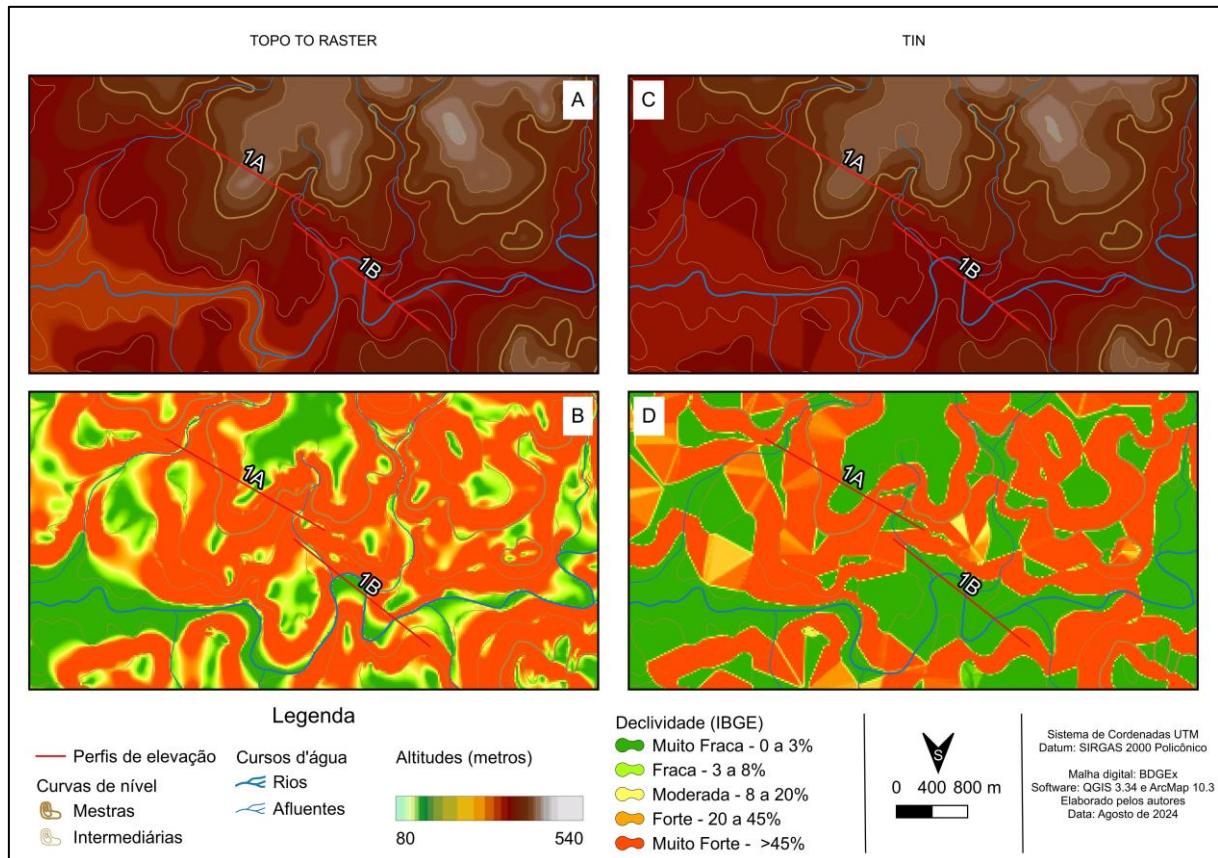
A seguir é realizada uma breve discussão sobre o que são esses parâmetros e o porquê a discrepância de valores entre os interpoladores podem provocar diferenças significativas em diferentes estudos, pois são utilizados em trabalhos como mapeamento de áreas úmidas (GUASSELLI; SIMIONI; LAURENT, 2020) da erosão e deposição de solos (MITÁŠOVÁ; HOFIERKA, 1993) de unidades de relevo (TRENTIN; ROBAINA, 2016; PRINA; TRENTIN, 2016) e caracterização morfométrica de bacias hidrográficas (ANDRADE *et al.*, 2008; CAPOANE; TROIAN, 2018).

O aspecto é um parâmetro que indica a direção para a qual as encostas estão voltadas (SHAPIRO; WAUPOTITSCH, 2024) e pode ser usado para derivar a direção do gradiente, direção da encosta mais íngreme e direção de fluxo (MITÁŠOVÁ AND HOFIERKA, 1993). A declividade reflete a taxa máxima de mudança dos valores de elevação do terreno além de poder ser usada na derivação de importantes parâmetros, como a erosão e deposição de solo e velocidade de fluxo (OLAYA, 2009). A direção de fluxo é o parâmetro hidrológico mais básico (GRUBER; PECKHAM, 2009) e é base para outros importantes parâmetros como o Índice Topográfico de Umidade (Topographic Wetness Index), que descreve a tendência de uma célula em acumular água (GRUBER; PECKHAM, 2009), e também o Índice Topográfico de Potência de Escoamento (Stream Power Index), o qual descreve o potencial de erosão e outros processos de superfície relacionados ao fluxo de água (GRUBER; PECKHAM, 2009). O plano e perfil de curvatura descrevem, respectivamente, o caráter divergente/convergente e convexo/côncavo do terreno, e representam fatores decisivos de aceleração ou desaceleração do fluxo de água no terreno (TRENTIN; ROBAINA, 2016; OLAYA, 2009).

Portanto, esses parâmetros desempenham um papel importante em diversos estudos, a sensibilidade de certos parâmetros e suas derivadas, como as curvaturas, reforçam a importância da escolha do método de interpolação e também de trabalhos de campo para validar os mapeamentos e evitar discrepâncias com a realidade, possibilitando uma modelagem do terreno e hidrologia mais fiel e concreta.

Na figura 4 temos uma aproximação do rio Toropi, próximo às suas principais nascentes, numa das áreas de maior altitude da BHRT. É possível notar algumas diferenças entre o resultado dos interpoladores apenas pelas cores empregadas nos mapas, cores essas que estão padronizadas e abrangem o mesmo intervalo e classes. Na figura 4A e 4B, as transições são mais suaves e os vales mais bem delineados, numa melhor representação da modelagem fluvial do relevo, enquanto que na Figura 4C e 4D, a diferença de altitudes é mais abrupta, com menor detalhamento dos vales e áreas de nascentes, onde é possível observar em algumas partes a forma de triângulos, devido à menor disponibilidade de dados nessas áreas.

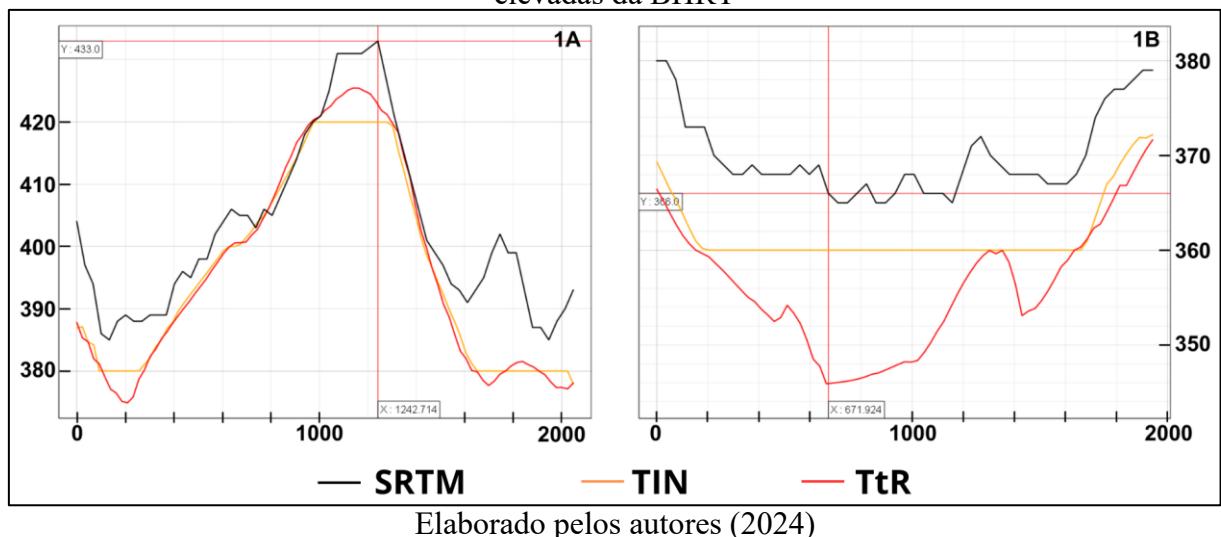
Figura 04- Hipsometria e Declividade dos modelos TtR (A, B) e TIN (C, D) em área de altitudes elevadas da BHRT



Elaborado pelos autores (2024)

Na figura 5, o perfil 1A demonstra uma linha com duas depressões e uma elevação entre elas com uma variação altimétrica de aproximadamente 60 metros, delimitada de forma um pouco quebrada no SRTM, onde há diversas pequenas alterações de elevação, enquanto que o resultado dos interpoladores apresentou uma grande correspondência entre si. Com uma maior diferença apenas na elevação, onde o TtR delineou o topo de forma arredondada, com mais detalhe, e o TIN uma forma mais achatada, com uma diferença de 5 metros entre eles.

Figura 5- Perfis de elevação 1A e 1B dos modelos TtR e TIN e SRTM, em área de altitudes elevadas da BHRT

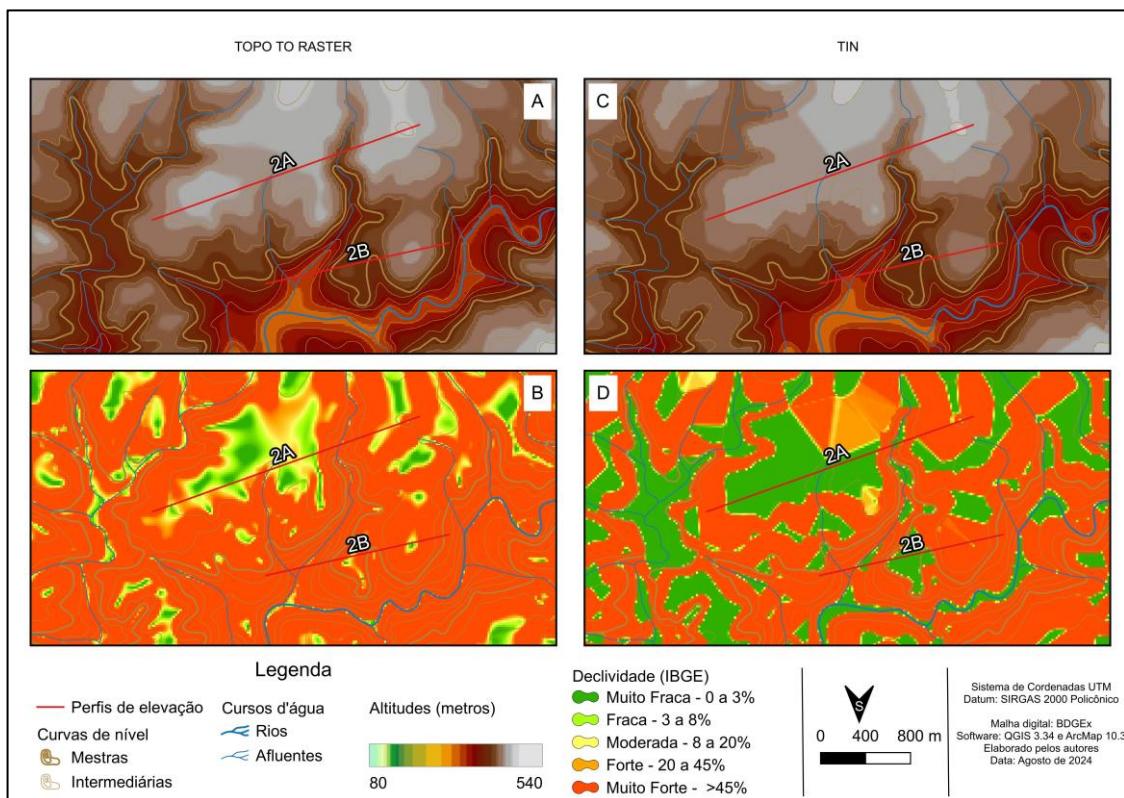


Já o perfil 1B mostra uma área de depressão, em que o SRTM apresenta variações de aproximadamente 15 metros, com pequenas variações ao longo do perfil. Enquanto que nos interpoladores, a diferença é gritante, o TIN é apresentado como uma linha reta entre o intervalo de 200 e 1600 metros, algo distante da realidade de um relevo tão movimentado e que perpassa cursos d'água de 1^a e 4^a ordem (STRAHLER, 1952), com diferenças de até 15 metros com o modelo TtR em áreas de vales, já o TtR apresentou uma delineação mais suave, principalmente do vale do rio Toropi, o qual é perpassado 3 vezes por esse perfil. Vale ressaltar que o SRTM não intersecciona os perfis do TIN e TtR em nenhum momento,

ressaltando a importância da escolha do interpolador adequado para diferentes análises topográficas.

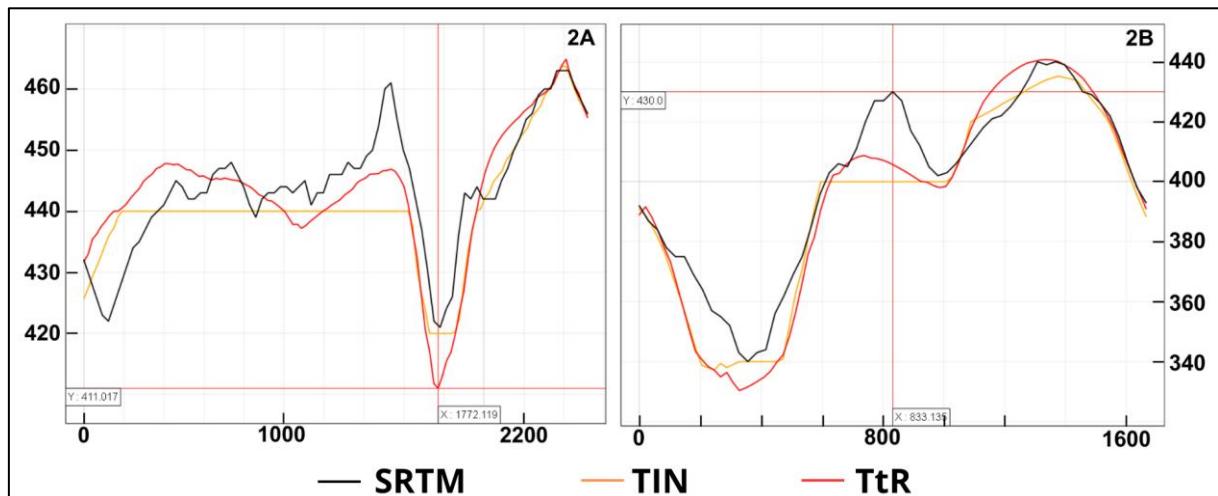
Na figura 6 é apresentada uma aproximação de áreas de nascentes do rio Ibicuí-mirim, onde é possível levantar os mesmos pontos falados anteriormente. Em que o TtR teve uma maior suavidade na delineação do relevo nas áreas de vales, com uma variação menos abrupta que o TIN. Entretanto, uma outra questão que pode ser destacada aqui é de como a delimitação em áreas próximas aos cursos d'água, mas não perpassadas por eles, é mais detalhada. A exemplo da área na porção noroeste no decorrer do perfil 2A, em que no TtR aparece uma feição elevada, em branco, com uma delimitação suave e que, provavelmente, condiz com a realidade, enquanto que no TIN, a mesma feição simplesmente não existe.

Figura 6- Hipsometria e Declividade dos modelos TtR (A, B) e TIN (C, D) em área de nascente da BHIM



Elaborado pelos autores (2024)

Figura 7- Perfis de elevação 2A e 2B dos modelos TtR e TIN e SRTM, em área de nascente da BHIM



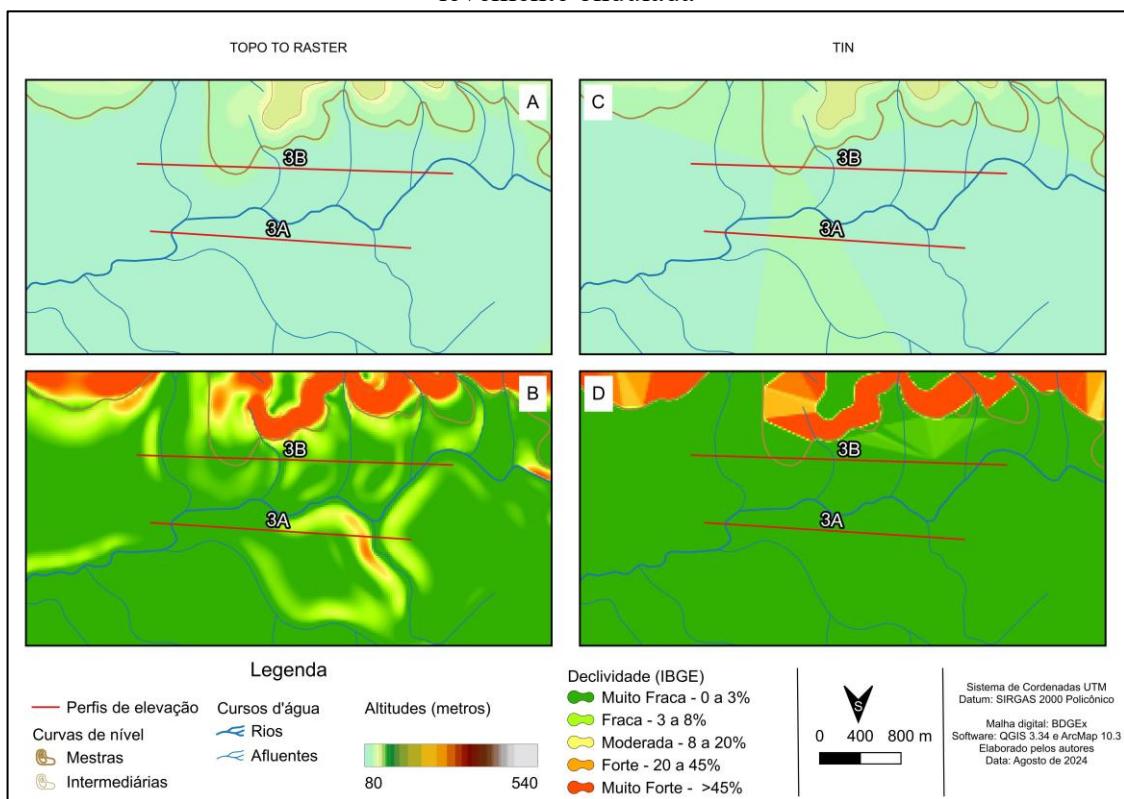
Elaborado pelos autores (2024)

O perfil 2B, o qual apresenta uma área de depressão, seguida de duas elevações, demonstra apenas algumas diferenças entre os modelos e o SRTM, em áreas de topo de morro e fundo de vale, em que o TtR apresentou uma delineação mais suave dessas feições, enquanto o TIN apresentou uma forma mais achatada do relevo, e o SRTM tem uma diferença mais acentuada numa elevação, onde a diferença com os modelos é de mais 15 metros.

O que mais chama atenção na figura 8 é o aumento na elevação no vale do rio Ibicuí-mirim, como se a jusante houvesse uma área mais elevada do que a montante, algo que não acontece no TtR, devido ao uso de cursos d’água na modelagem do MDE. As outras questões dessa área são as mesmas já levantadas anteriormente, portanto não se vale de uma discussão mais aprofundada.

Na figura 9, o perfil 3A apresenta uma área de elevações que variam entre 100 e 91 metros no SRTM, enquanto que nos interpoladores é visível duas elevações e uma depressão entre elas.

Figura 8 - Hipsometria e Declividade dos modelos TtR (A, B) e TIN (C, D) em área plana, levemente ondulada



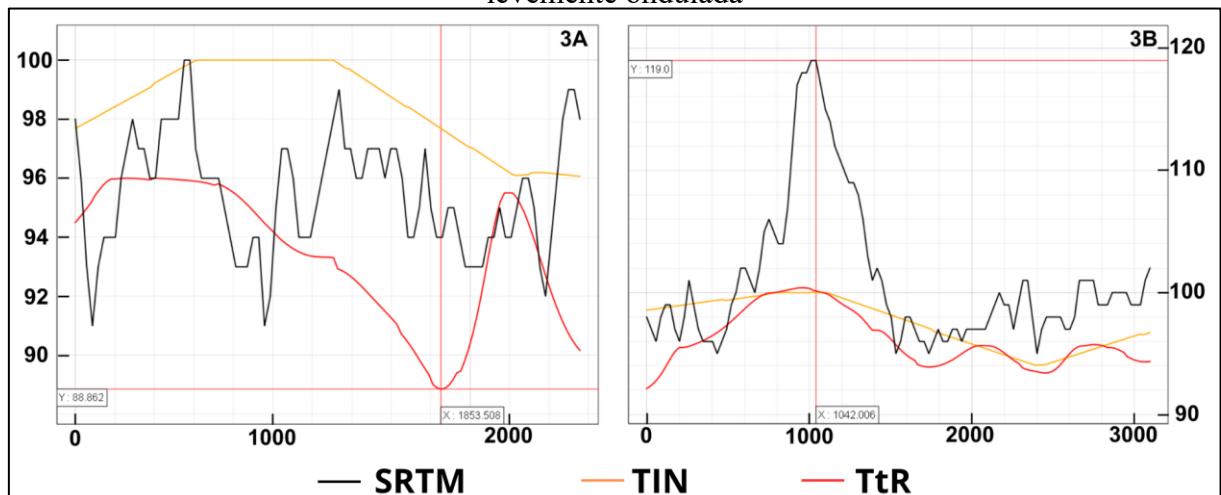
Elaborado pelos autores (2024)

Pode-se observar um aumento da elevação a jusante no TIN, representado por uma linha reta de aproximadamente 600 metros de extensão e 100 metros de elevação. No entanto, no TtR, o mesmo trecho apresenta variações na elevação, que oscilam entre 96 e 93 metros, com uma encosta bem definida. No trecho seguinte, o TtR revela uma encosta convexa que desce até uma elevação mínima de 88 metros antes de subir novamente para quase 96 metros. Em contraste, o TIN representa esse mesmo trecho como uma simples linha reta descendente, indo de 100 a 96 metros, sem qualquer sinuosidade. É importante destacar que, nesse perfil, os modelos não se cruzam em nenhum ponto, indicando uma baixa correspondência entre os valores gerados pelos interpoladores ao criar MDEs em áreas planas.

Já no perfil 3B, é mais perceptível a relação entre os modelos, devido às intersecções e maior similaridade entre os valores de elevação. Entretanto, há algumas diferenças notáveis

entre os modelos, como num primeiro segmento, onde o TtR apresenta uma elevação de 8 metros (92 - 100 metros) com algumas sinuosidades, enquanto que o TIN apresenta uma variação de pouco mais de 1 metro nesse mesmo segmento, em toda sua extensão, o perfil 3B do TIN conta com 4 segmentos de linhas praticamente retas, enquanto que o TtR apresenta um maior detalhamento das variações hipsométricas do relevo, com depressões e colinas bem delineadas. E ao compararmos com o SRTM, há uma grande discrepância com ambos os modelos na área mais elevada, onde o SRTM apresenta uma altimetria acrescida em quase 20 metros em relação aos modelos.

Figura 9 - Perfis de elevação 3A e 3B dos modelos TtR e TIN e SRTM, em área plana, levemente ondulada



Fonte: Elaborado dos autores (2023)

Esses resultados demonstraram que o TIN é mais adequado para a geração de MDEs em escala média, sem um grande nível de detalhamento e em áreas de maior declividade, como é o caso da BHRT e BHIM, enquanto o TtR apresenta um bom desempenho em áreas planas, suavemente onduladas e de vales de rios, com uma delimitação fiel à realidade na extensão dos cursos d'água. Esses resultados condizem com o de outros trabalhos, como o de Souza et al. (2009) em que o TIN apresenta um melhor desempenho em áreas de alta declividade, onde há bastante informação, enquanto que em áreas de menor declividade, o

desempenho é pior (SOUZA *et al.* 2009) e de Cecílio *et al.* (2013), onde os autores concluíram que o TtR com base em arquivos vetoriais gerou uma melhor delimitação do MDE e da bacia hidrográfica gerada em relação a outros métodos.

Por outro lado, o método TIN é amplamente utilizado em aplicações de escala média (OLSZEVSKI *et al.*, 2011; ANDRADE *et al.*, 2008; TRENTIN; ROBAINA; SANTOS, 2009), especialmente quando há uma alta densidade de pontos, como em dados de sensores LIDAR (Light Detection and Ranging) (MARTINS *et al.*, 2020; MIRANDA *et al.*, 2018).

Considerações Finais

- Conclui-se que, entre os métodos analisados, não há um interpolador que terá melhor desempenho em todos os cenários, sendo necessário considerar diferentes aspectos do trabalho e da área de estudo para uma escolha mais adequada.
- A análise comparativa dos métodos de interpolação *TIN* e *TopoToRaster* indica que o TtR é mais adequado para a geração de MDEs em bacias hidrográficas para análise hidrográfica, especialmente em áreas planas e levemente onduladas. Sua capacidade de gerar superfícies mais suaves e hidrologicamente precisas faz com que este método seja preferível em estudos que exigem um alto grau de detalhe e precisão. Por outro lado, o *TIN* pode ser uma alternativa viável em cenários onde uma representação menos detalhada seja necessária ou que haja um número muito grande de pontos para interpolação, já que esse método exige muito menos capacidade de processamento.
- Essas observações sugerem que, embora o *TIN* tenha vantagens em contextos específicos, sua aplicação em grandes escalas pode não oferecer os melhores resultados em termos de precisão geomorfométrica. Essa limitação deve ser considerada ao selecionar a técnica de interpolação para estudos de bacias hidrográficas em escalas maiores e com maior nível de detalhe.
- Quanto a representação do terreno referente aos MDEs, o TtR apresenta uma representação espacial com continuidade mais suavizada enquanto o modelo TIN

representa descontinuidades mais abruptas em função das faces triangulares utilizadas no modelo, o que em produtos de segunda ordem podem ser ainda mais pronunciados como por exemplo as classes de declividades com limites mais abruptos. Para a geração dos produtos o modelo TIN utilizou-se apenas os dados de entrada de elevação, referentes as curvas de nível e pontos cotados, já para o modelo TtR foram utilizados os dados referentes aos cursos d'água e, neste caso, é essencial que estes tenham a vetorização realizada no sentido do fluxo dos cursos d'água, visto que o modelo utiliza o mesmo como definição do canal e sentido de escoamento.

- Portanto, considera-se que a escolha entre os métodos Topo to Raster e TIN deve ser orientada pelo objetivo da análise e pelas características dos dados de entrada disponíveis. Para estudos que precisam de uma precisão maior na representação do relevo, especialmente em áreas com maior declive e variações de altitude, o método TIN foi o mais indicado neste trabalho. Já para análises que exigem uma abordagem mais consistente para questões hidrológicas, principalmente em regiões mais planas ou com ondulações suaves, a melhor escolha foi o método Topo to Raster.
- Outrossim, quanto ao processamento e armazenamento, o TIN apresentou um processamento mais rápido, com apenas 3,27 segundos, enquanto o TtR demorou 22 minutos e 37 segundos para processar e gerar o MDE. Foram gerados arquivos GeoTIFF de tamanhos praticamente iguais entre o TIN e TtR, de 99,37Mb e 99,38Mb, respectivamente, o SRTM da mesma área apresentou quase $\frac{1}{4}$ desses tamanhos, com apenas 22,84Mb em toda a área de estudo.
- Para estudos futuros, recomenda-se a exploração da combinação de diferentes métodos de interpolação, em vistas de integrar as vantagens de cada método para melhorar a precisão dos MDEs em diferentes contextos. Além disso, a utilização de outras camadas vetoriais, como a delimitação de açudes e infraestrutura, poderia aumentar ainda mais a precisão da geração MDEs, conforme as necessidades do estudo em curso.

Referências

- Aguilar, Carolina Bracco Delgado De; Flain, Eleana Patta; Coelho, Eliene Corrêa Rodrigues. (2018). *O mundo das geotecnologias: ferramentas de análise e representação territorial*. Mackenzie. ISBN: 978-85-8293-730-3.
- Andrade, Nara Luiza Reis De; Xavier, Fernanda Vieira; Alves, Édina Cristina Rodrigues De Freitas; Silveira, Alexandre; Oliveira, Carlos Ueslei Rodrigues. (2008). Caracterização morfométrica e pluviométrica da bacia do rio Manso – MT. *Geociências*. Vol. 27, n. 2, p. 237-248.
- <https://www.periodicos.rc.biblioteca.unesp.br/index.php/geociencias/article/view/3362>
- Bricalli, Luiza Leonardi. Procedimentos Metodológicos e Técnicas em Geomorfologia Tectônica. *Espaço Aberto*, UFRJ: Rio de Janeiro. v. 6, n. 1, 2016. DOI: <https://doi.org/10.36403/espacoaberto.2016.5239>. Disponível em: <https://revistas.ufrj.br/index.php/EspacoAberto/article/view/5239>. Acesso em: 08 set. 2025.
- Capoane, Viviane; Troian, Alexandre. (2018). Uso de atributos geomorfométricos e uso da cobertura da terra como subsídio ao planejamento ambiental na bacia hidrográfica do rio Guaporé. In: Simpósio Internacional de Educação Ambiental e Sustentabilidade, 1., 2018, Santa Maria. **Anais** [...]. https://www.researchgate.net/publication/331385331_Uso_de_atributos_geomorfometricos_e_uso_e_cobertura_da_terra_como_subsidio_ao_planejamento_ambiental_na_bacia_hidrografica_do_rio_Guapore.
- Cassetti, Valter. (1994). *Elementos de Geomorfologia*. Editora da UFG. ISBN: 85-7274-030-9.
- Cecílio, Roberto Avelino; Coutinho, Luciano Melo; Xavier, Alexandre Cândido; Moreira, Michel Castro; Zanetti, Sidney Sara; Garcia, Giovanni de Oliveira. (2013). Delimitação de bacia hidrográfica em região montanhosa a partir de diferentes modelos digitais de elevação. *Semina: Ciências Agrárias*, [S. l.], Vol. 34, n. 5, p. 2007–2024. DOI: [10.5433/1679-0359.2013v34n5p2007](https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n5p2007).

Environmental Systems Research Institute. (2021). *ArcMap: How Topo To Raster works.*

<https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/tools/spatial-analyst-toolbox/how-topo-to-raster-works.htm>.

Gomes, Francisco Carlos Moreira; Zaidan, Ricardo Tavares; Rocha, Cézar Henrique Barra. (2022). Análise comparativa entre a aplicação de métodos de interpolação, para a geração de modelos digitais de elevação. *Revista Brasileira de Geografia Física*. Vol. 15, n. 5, p. 2448-2462. <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/253224>.

Gruber, S; Peckham, S. (2009). Land-surface parameters and objects in hydrology. In: Hengl, Tomislav; Reuter, Hannes I (orgs.). *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in soil science*. Elsevier. Vol. 33, p. 171-194. ISBN: 978-0-12-374345-9.

Guasselli, Laurindo Antonio, Simioni, João Paulo Delapasse; Laurent, François. (2020). Mapeamento e classificação de áreas úmidas usando Topographic Wetness Index (TWI) a partir de modelos digitais de elevação, na bacia hidrográfica do rio Gravataí - Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira De Geomorfologia*. Vol. 21, n. 3. <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1714>.

Guerra, Antonio Teixeira. (1993). *Dicionário Geológico Geomorfológico* (8a ed). IBGE. ISBN: 85-240-0458-4.

Hengl, Tomislav; Evans, Ian S. (2009). Mathematical and Digital Models of the Land Surface. In: Hengl, Tomislav; Reuter, Hannes I (orgs.). *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in soil science*. Elsevier. Vol. 33, p. 31-63. ISBN: 978-0-12-374345-9.

Hofierka, Jaroslav; Mitášová, Helena; Neteler, Markus. (2009). Geomorphometry In Grass Gis. In: Hengl, Tomislav; Reuter, Hannes I (orgs.). *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in soil science*. Elsevier. Vol. 33, p. 387-410. ISBN: 978-0-12-374345-9.

Hutchinson, Michael F. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*. Elsevier. Vol. 106, n. 3/4, p. 211-232. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(89\)90073-5](https://doi.org/10.1016/0022-1694(89)90073-5).

- Martins, Tiago Damas; Oka-Fiori, Chisato; Vieira, Bianca Carvalho; Bateira, Carlos. (2020). Considerações sobre o LiDAR na análise de instabilidade de vertentes. *Terr@ Plural*. [S. l.], Vol. 14, p. 1–15. <https://revistas.uepg.br/index.php/tp/article/view/15381>.
- Minár, Jozef; Minár Jr., Josef; Evans, Ian S. (2015). Towards exactness in geomorphometry. In: Jasiewicz, J.; Zwolinski, Z B; Mitasova, H; Hengl, T. (orgs.). *Geomorphometry for geosciences*.
- Miranda, Gisele Horta Barroso.; Medeiros, Nilcilene Das Graças.; Santos, Afonso De Paula Dos; Santos, Gerson Rodrigues dos. (2018). Análise de Qualidade de Amostragem e Interpolação na Geração de MDE. *Revista Brasileira de Cartografia*. [S. l.], Vol. 70, n. 1, p. 226–257. <https://doi.org/10.14393/rbcv70n1-45255>.
- Mitášová, Helena; Hofierka, Jaroslav. (1993). Interpolation by regularized spline with tension: II. Application to terrain modeling and surface geometry analysis. *Mathematical Geosciences*. Vol. 25, p. 657–669. <https://doi.org/10.1007/BF00893172>.
- Olaya, Victor. (2009). *Basic land-surface parameters*. In: Hengl, Tomislav; Reuter, Hannes I (orgs.). *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Developments in soil science*. Elsevier. Vol. 33, p. 141-169, 2009. ISBN: 978-0-12-374345-9.
- Olszevski, Nelci; Fernandes Filho, Elpídio Inácio; Costa, Liovando Marciano Da; Schaefer, Carlos Ernesto Gonçalves Reynaud; Souza, Eliana De; Costa, Oldair Del'arco Vinhas. (2011). Morfologia e aspectos hidrológicos da bacia hidrográfica do rio Preto, divisa dos estados do Rio de Janeiro e de Minas Gerais. *Revista Árvore*. UFV, Vol. 35, n. 3, p. 485-492, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622011000300011>.
- Open Source Geospatial Foundation. (2024). *A gentle introduction to GIS: Spatial Analysis (Interpolation)*. https://docs.qgis.org/3.34/en/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html.
- Pike, Richard J. (2000). Geomorphometry – diversity in quantitative surface analysis. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*. Vol. 24, n. 1, p. 1-20. <https://doi.org/10.1177/030913330002400101>.

- Pike, Richard J.; Evans, Ian S.; Hengl, Tomislav. (2009). Geomorphometry: a brief guide. In: Hengl, Tomislav; Reuter, Hannes I (orgs.). Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. *Developments in soil science*. Elsevier. Vol. 33, p. 03-30. ISBN: 978-0-12-374345-9.
- Prina, Bruno Zucuni; Trentin, Romario. (2016). Caracterização detalhada das unidades de relevo do município de Jaguari (RS)/Brasil. *Caderno de Geografia*. Vol. 26, n. 46. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=333246778007>.
- Shapiro, Michael; Waupotitsch, Olga. (2024). *r.slope.aspect - Generates raster maps of slope, aspect, curvatures and partial derivatives from an elevation raster map*. <https://grass.osgeo.org/grass84/manuals/r.slope.aspect.html>.
- Souza, Leandro Gomes; Sousa, Gustavo Mota De; Coura, Pedro Henrique Ferreira; Fernandes, Manoel de Couto. (2009). Avaliação de Modelos Digitais de Elevação para estudos geoecológicos no Maciço da Pedra Branca, Rio de Janeiro, Brasil. *Anuário do Instituto de Geociências*. UFRJ. Vol. 32, n. 1, p. 21-33. https://doi.org/10.11137/2009_1_21-33.
- Strahler, Arthur Newell. (1952). Hypsometric (Area-Altitude) analysis of erosional topography. *GSA Bulletin*. Vol. 63, n. 9, p. 923–938. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1952\)63\[1117:HAAOET\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2).
- Trentin, Romario; Robaina, Luis Eduardo De Souza. (2016). Classificação das unidades de relevo através de parâmetros geomorfométricos. *Mercator*. UFC. Vol. 15, n. 3, p. 53-66. <https://www.scielo.br/j/mercator/a/xxHWcBh9FmnQpJ9xfBy6x9p/#>.
- Trentin, Romario; Robaina, Luis Eduardo De Souza; Santos, Leonardo José Cordeiro. (2009). Mapeamento geomorfológico da bacia hidrográfica do Rio Itu, oeste do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas Em Geociências*. Vol. 36, n. 1, p. 95–105. <https://doi.org/10.22456/1807-9806.17877>.
- USGS – EROS center. *USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*. 2018. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs->

[eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm](#). Acesso em: 11 set. 2025.

Publisher: Universidade Federal de Jataí. Instituto de Geografia. Programa de Pós-graduação em Geografia. Publicação no Portal de Periódicos UFJ. As ideias expressadas neste artigo são de responsabilidade de seus autores, não representando, necessariamente, a opinião dos editores ou da universidade.

Contribuições dos autores: Gustavo Soares Arrial: coleta, organização e processamento de dados, elaboração de mapas e tabelas, escrita, análise dos resultados e discussão; Romario Trentin: escrita, supervisão, análise formal de dados, validação e revisão da escrita e discussão. Declaramos ainda ciência das Diretrizes Gerais da Geoambiente On-line.

Financiamento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela concessão de apoio financeiro a projetos de pesquisa com o Termo de outorga: 132108/2024-0, pelo Edital CNPq 35/2023 – Programa Institucional de Bolsas de Pós-graduação (PIBPG).

Conflito de interesse: Os autores declaram que não possuem interesses financeiros ou não financeiros relevantes relacionados a este trabalho.