

# Comparação entre redes de drenagem extraídas de modelos digitais de elevação global com direção de fluxo simples e múltiplo

## Comparison of drainage network extracted from global digital elevation models with simple-flow and multi-flow direction

Willian Bortolini \*, Claudinei Taborda da Silveira \*\*, Lionel Siame \*\*\*

\*Departamento de Geografia, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, Paraná, willianbortolini@gmail.com

\*\*Departamento de Geografia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, claudineits@ufpr.br

\*\*\*Aix Marseille Univ, CNRS, IRD, INRAE, CEREGE, Aix-en-Provence, França, siame@cerge.fr

<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v62i1.97231>

### Resumo

No ano de 2022, foi disponibilizado o modelo FABDEM, o qual a partir do uso de técnicas de *machine learning* seus desenvolvedores removeram do modelo digital de elevação (MDE) COPDEM a elevação da vegetação e edificações. Neste contexto, este trabalho teve por objetivo: analisar e comparar as redes de drenagem extraídas a partir dos modelos globais SRTM, COPDEM e FABDEM, com métodos de direção de fluxo simples e múltiplo, tendo como foco uma área de planície de inundação na região centro-leste do estado do Paraná. Foram comparados os dados de elevação e a declividade oriunda dos três modelos, bem como calculada a acurácia vertical a partir do erro quadrático médio (EQM) entre cada modelo e os dados de referência obtidos em uma base cartográfica oficial na escala 1:50000. Foram extraídas as redes de drenagem usando diferentes métodos de definição da direção de fluxo e parâmetros a partir dos algoritmos implantados no GRASS GIS. A qualidade das redes de drenagem extraídas foi analisada a partir da comparação com a rede hidrográfica oficial que está disponível, na escala 1:50000, pela elaboração de perfis topográficos e de perfis longitudinais. Os resultados mostraram a maior acurácia vertical do FABDEM, bem como seu melhor desempenho na extração da rede de drenagem quando combinado ao método de direção de fluxo múltiplo. Entretanto, o modelo FABDEM ainda apresenta limitações na extração de redes de drenagem em planícies de inundação devido, sobretudo, a impossibilidade de filtrar por completo a influência da vegetação em seus dados altimétricos.

### Palavras-chave:

SRTM, COPDEM, FABDEM, Rede hidrológica, Planície de inundação.

### Abstract

In 2022, the FABDEM model was released. Its developers used machine learning techniques to remove the height of forest canopy and buildings from the COPDEM digital elevation model (DEM). In this context, the objective of this study was to analyze and compare the drainage networks extracted from the SRTM, COPDEM and FABDEM global models using single and multiple flow direction methods, focusing on a floodplain area in the central-eastern region of the State of Paraná. Elevation and slope data from the three models were compared, and vertical accuracy was calculated from the mean square error (MSE) between each model and the reference data obtained from an official 1:50000 cartographic base. Drainage networks were extracted using different methods to define the flow direction and parameters of the algorithms implemented in GRASS GIS. The quality of the extracted drainage networks was analyzed by comparing them with the official 1:50000 hydrographic network and with topographic and longitudinal profiles. The results showed the higher vertical accuracy of FABDEM, as well as its better performance in extracting the drainage network when combined with the multiple flow direction method. However, the FABDEM model still has limitations when it comes to extracting drainage networks in floodplains, mainly because it was not successful to completely filter out the influence of vegetation in its altimetric data.

**Keywords:**

SRTM, COPDEM, FABDEM, Hydrological network, Floodplain.

## I. INTRODUÇÃO

Durante as últimas décadas, a quantificação da superfície terrestre a partir de modelos digitais de elevação (MDEs, que representam a superfície levando em conta objetos como a vegetação e construções) e modelos digitais de terreno (MDTs, que representam a superfície não levando em conta objetos) tem avançado e têm sido fundamental em áreas do conhecimento como a geomorfologia, geologia, hidrologia, ciências do solo, ciências agrícolas, oceanografia, ciências da vegetação, climatologia, meteorologia, planejamento urbano (El-Sheimy; Valeo; Habib, 2005; Hengl; Macmillan, 2009; Pike; Evans; Hengl, 2009).

Entre as décadas de 1960 e 2000, o desenvolvimento de computadores, técnicas de processamento digital de dados e a disponibilidade de técnicas de sensoriamento remoto (ex.: fotogrametria, imagens de satélite e lasers) permitiram a extração de informações da elevação da superfície terrestre. Somados ao contínuo avanço das técnicas citadas, nos últimos 25 anos os incrementos na capacidade de armazenamento de dados, a facilitação do acesso à internet, e o desenvolvimento de técnicas de *machine learning* e inteligência artificial, possibilitaram a geração e disponibilização de MDEs de alta resolução para grandes áreas (Kidner; Smith, 2003; Lakshmi; Yarrakula, 2018; Hawker et al., 2022). Neste contexto, surge a oferta de MDEs globais ou quase-globais gerados através de levantamentos por radares de satélites, como por exemplo o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), *Nasa Digital Elevation Model* (NasaDEM), *Advanced Land Observing Satellite* -

*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar* (Alos PALSAR) e *Copernicus Digital Elevation Model* (COPDEM), ou gerados através de estereoscopia, como o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - Global Digital Elevation Model* (Aster GDEM).

Os MDEs globais ou quase-globais se destacam nas aplicações nas geociências devido ao seu baixo custo e ampla disponibilidade geográfica. Porém, uma limitação importante em seus dados está no fato de que a elevação estimada pelos sensores orbitais considera a elevação da vegetação (com a contribuição do dossel da vegetação) e de edificações. Pensando nisto, Hawker et al. (2022) empregaram técnicas de *machine learning* para remover a contribuição das superfícies de florestas e construções e assim gerar o primeiro MDT global, denominado de *Forest and Building Digital Elevation Model* (FABDEM), com 30 metros de resolução espacial. Os autores compararam este modelo a seus dados de origem (ou seja, o modelo COPDEM) e ao modelo *Multi Error Removed Improved-Terrain Digital Elevation Model* (MERIT DEM) em diversos ambientes (ex.: áreas urbanas, florestas, florestas boreais, solo exposto, planícies de inundação), onde o FABDEM apresentou o menor erro estatístico.

A partir da publicação deste novo modelo, uma série de trabalhos vêm sendo realizados e publicados com o objetivo de comparar a qualidade do FABDEM em relação aos demais modelos globais. Alguns se concentram nas comparações focadas em áreas geográficas específicas (Dandabathula et al., 2023; Iqbal et al., 2023; Krdžalić et al., 2024) e outros em diversas áreas ao redor do globo (Bielski et al., 2024; Meadows; Jones e Reinke, 2024). A maioria destes trabalhos utilizam como dados de referência modelos gerados a partir de levantamentos utilizando a ferramenta *Light Detection and Ranging* (LiDAR). Em linhas gerais, estes trabalhos vêm demonstrando, em diferentes ambientes, a superioridade do FABDEM como o modelo mais fidedigno na representação da superfície do terreno (desconsidera a vegetação e edificações).

No contexto das aplicações dos MDEs e MDTs nas Ciências da Terra, as redes de drenagem oriundas de MDEs/MDTs são um dos principais produtos da modelagem digital do terreno. Diferentes algoritmos de extração de redes de drenagem foram desenvolvidos e estão disponíveis em softwares ou aplicações como o GRASS GIS (Grass Development Team, 2017) e o TopotoolBox (Schwanghart; Scherler, 2014). Na geomorfologia, por exemplo, a extração de redes de drenagem é fundamental para as análises morfométricas baseadas nas “Leis de Horton” (Horton, 1945), no índice SL (Hack, 1973), no índice  $k_s$  (Snyder et al., 2000) e no índice  $\chi$  (Perron e Royden, 2013). Também é fundamental em áreas como a modelagem hidrológica (Giannoni, Roth e Rudari, 2005) e no planejamento urbano (Duarte et al., 2013).

Na última década, o processo de extração automática de redes de drenagem continua sendo alvo de estudos (Ahmadi et al., 2014; Lindsay; Yang; Hornby, 2019; Borgohain et al., 2023), sobretudo em áreas de planícies de inundação (Chen et al., 2024). Comparações entre redes de drenagem extraídas através de diferentes fontes de dados de elevação também têm sido realizadas. Por exemplo, Ahmadi et al. (2014) identificaram que em uma bacia hidrográfica montanhosa no Irã a rede de drenagem derivada do Aster DEM (resolução de 29 m) é mais acurada quando comparada e à derivada do SRTM (resolução de 90 m) e de duas bases topográficas nas escalas 1:25000 e 1:50000. Por sua vez, Borgohain et al. (2023) identificaram que para uma área plana nos Himalaias indianos a rede de drenagem derivada do MERIT DEM apresentou linhas que aparentam ser mais naturais quando comparado aos resultados derivados do FABDEM. Entretanto, a rede de drenagem derivada do FABDEM apresentou maior detalhamento, devido à sua maior resolução espacial. Gaida et al. (2024), em uma área florestada no estado do Rio Grande do Sul, identificaram que a rede de drenagem derivada do FABDEM apresenta maior correspondência espacial com a drenagem existente quando comparada às redes de drenagem derivadas do SRTM e do Aster GDEM. Em geral, as principais limitações na extração automática de redes de drenagem estão ligadas à acurácia dos resultados, erros topológicos e aspecto visual não natural (ex: linhas retilíneas) (Ahmadi et al., 2014; Lindsay; Yang; Hornby, 2019; Borgohain et al., 2023).

Neste novo contexto surgido a partir da elaboração e disponibilização do FABDEM, abre-se a possibilidade de pesquisas acerca do potencial deste modelo na extração automática de redes de drenagem. Devido ao fato dos dados do FABDEM, ao menos em teoria, não considerarem a elevação da vegetação e das edificações, tem-se a hipótese de as redes de drenagem derivadas deste modelo apresentem delimitação mais natural quando comparadas às redes de drenagem derivadas de outros modelos de mesma resolução espacial, como o SRTM ou o COPDEM.

Neste modo, o objetivo deste trabalho foi analisar e comparar às redes de drenagem extraídas do novo modelo global FABDEM às de outros dois modelos globais, o COPDEM por ser a versão precedente, também o SRTM, por representar o MDE global que foi mais amplamente mais utilizado. A análise contemplou o emprego de direção de fluxo simples e múltiplo, tendo como foco principal a área de planície de inundação do Rio Iapó (região centro-leste do Paraná). Para isso, foram comparados seus dados altimétricos a partir do cálculo das respectivas acurácias verticais usando como dados de referências as elevações oriundas de cartas topográficas digitalizadas, que constitui a base cartográfica de referência disponível no estado do Paraná.

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

### DADOS DE ELEVAÇÃO E DADOS DE REFERÊNCIA

Foram obtidos os seguintes modelos digitais de elevação/terreno globais, com as respectivas características:

- *Shuttle Radar Topography Mission* v. 3 (SRTM): resolução horizontal de 1 arco de segundo (~30 metros). Os dados foram adquiridos entre 11 e 22 de fevereiro de 2000, sendo oriundos da banca C do radar (National Aeronautics and Space Administration, 2024). Disponível em: [www.earthdata.nasa.gov/](http://www.earthdata.nasa.gov/);
- Copernicus DEM (COPDEM): resolução horizontal de 1 arco de segundo (~30 metros). Os dados foram adquiridos entre 2011 e 2015 através da missão TanDEM-X (Copernicus, 2024). Disponível em: [panda.copernicus.eu/](http://panda.copernicus.eu/);
- *Forest and Building* DEM v. 1.2 (FABDEM): resolução horizontal de 1 arco de segundo (~30 metros). Dados oriundos do modelo COPDEM (Hawker et al., 2022). Disponível em: [data.bris.ac.uk/data/dataset/25wfy0f9ukoge2gs7a5mqpq2j7](http://data.bris.ac.uk/data/dataset/25wfy0f9ukoge2gs7a5mqpq2j7);

Todos os três modelos foram submetidos a um pré-processamento que consistiu no preenchimento de depressões através do algoritmo de Wang e Liu, disponível no SAGA GIS 2.3.2 (Conrad et al., 2015).

Foram utilizados os dados de elevação e hidrografia das cartas topográficas do IBGE/DSG na escala 1:50.000, digitalizados e vetorizados pelo instituto Águas do Paraná (hoje integrado ao Instituto Águas do Paraná). Como pontos de dados de referência para o cálculo da acurácia vertical de cada modelo, foram selecionados os pontos cotados e os pontos de intersecções entre a rede de drenagem e as curvas de nível.

### COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS E CÁLCULO DAS ACURÁCIAS VERTICAIS

A comparação entre os modelos globais seguiu parcialmente as etapas metodológicas realizadas por Silveira e Silveira (2015). O valor máximo, o valor médio e o desvio padrão da diferença entre os dados de elevação e de declividade oriundos da comparação entre os modelos foram calculados. As acurácias verticais foram calculadas através do erro quadrático médio (EQM) (Equação 1) entre a elevação de cada modelo e os pontos utilizados como dados de referência, não havendo diferenciação para o cálculo do erro considerando o uso do solo da área.

$$EQM = \frac{\sqrt{\sum(z_m - z_r)^2}}{n} \quad (\text{Equação 1})$$

onde  $z_m$  é a elevação do modelo,  $z_r$  é a elevação do ponto do dado de referência, e  $n$  é o número de pontos de dados de referência.

A comparação entre os valores de elevação e declividade dos modelos foi realizada em uma área localizada na região centro-leste do estado do Paraná (Figura 1H). Essa região tem por característica uma heterogeneidade, sendo subdividida em três principais compartimentos geomorfológicos: i) Reverso da Escarpa Devoniana, composto por rochas sedimentares Paleozoicas e relevo de alta/moderada dissecação; ii) Depressão do Piraí, composta por granitos porfíricos, quartzitos e rochas vulcano-sedimentares, e relevo de baixa dissecação; iii) Vale do Alto Ribeira, composto por rochas metamórficas e ígneas, e relevo com alta dissecação (Mineropar, 2001; 2006; Oka-Fiori et al., 2006; Santos et al.; 2006). A região também é caracterizada pela presença de estruturas geológicas lineares de direção NW-SE e NE-SW, associadas ao Arco de Ponta Grossa e ao Sistema de Riftes Cenozoicos do Sudeste do Brasil (Ferreira, 1982; Zalán et al., 1987; Zalán; Oliveira, 2005). Como resultado da presença destas estruturas, é observado o controle estrutural sobre parte da rede de drenagem da região (Firmino, 2015; Oliveira; Pinto, 2015; Barreto; Pinto, 2017; Firmino; Souza Filho, 2017).

Por sua vez, para a comparação das acurácias verticais entre os modelos foi realizado em três diferentes áreas nesta mesma região. As três áreas foram selecionadas por se localizarem nos três diferentes compartimentos geomorfológicos (ou seja, diferentes características topográficas) e apresentarem o predomínio de diferentes usos do solo: a) a área 1 ( $\approx$  36 mil hectares) apresenta relevo plano (declividade  $<12,5\%$ ) a ondulado (declividade  $>12,5\%$  e  $<25\%$ ) (Figura 1A) e predomínio de plantações e pastagens (Figura 1B); b) a área 2 ( $\approx$  56 mil hectares) apresenta relevo plano (declividade  $<12,5\%$ ), situado sobre a planície de inundação do Rio Iapó (Figura 1C), e predomínio de plantações e pastagens (Figura 1D); c) a área 3 ( $\approx$  70 mil hectares) apresenta relevo fortemente ondulado (declividade  $>25\%$  e  $<50\%$ ) (Figura 1E) e predomínio de áreas de floresta (Figura 1F).

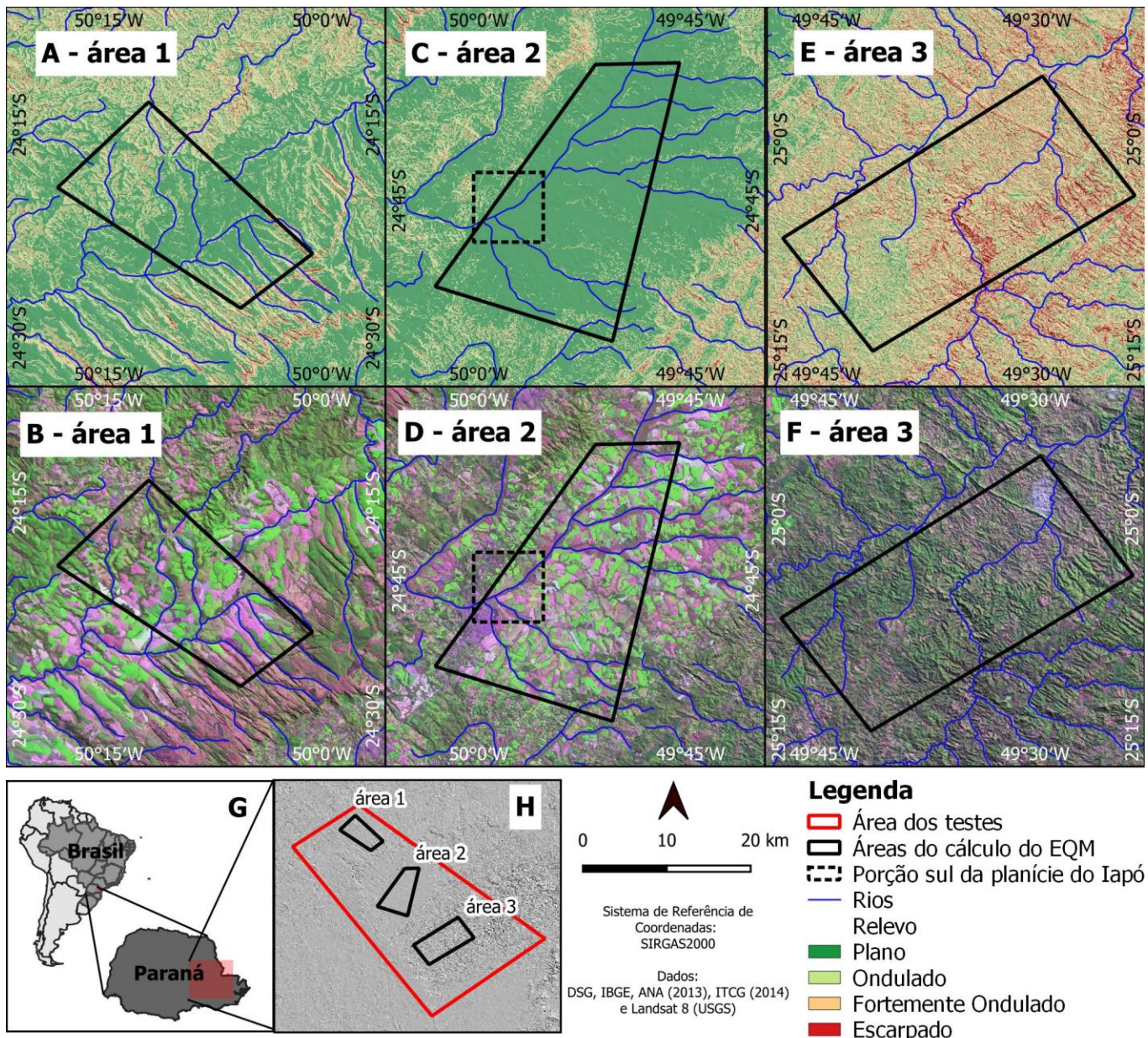


Figura 1 – Áreas onde as comparações entre modelos globais foram realizadas. A, C e E: classificação do relevo baseado em Bielski et al. (2024); B, D e F: composição RGB realizada a partir de imagem *Landsat 8*; G: localização da área de estudo em relação ao Brasil e ao estado do Paraná; H: localização da área teste e das três áreas utilizadas para o cálculo do EQM.

### DELIMITAÇÃO E ANÁLISE DA QUALIDADE DAS REDES DE DRENAGEM ORIUNDAS DE DIFERENTES MODELOS GLOBAIS

A delimitação das redes de drenagem para cada modelo foi realizada a partir dos métodos de direção de fluxo simples (*simple-flow direction – SFD*) e de direção de fluxo múltiplo (*multi-flow direction – MFD*), disponíveis no GRASS GIS 7.8.4 (Grass Development Team, 2017). Foram testadas acumulações de fluxo mínimas de 100 pixels (90.000 m<sup>2</sup>) e 500 pixels (450.000 m<sup>2</sup>).

A análise qualitativa dos resultados foi realizada a partir da interpretação de perfis altimétricos e longitudinais, observações de campo e a comparação dos dados de referência (base hidrológica do DSG/IBGE na escala 1:50000), imagens Landsat 8 e as redes de drenagem extraídas. É importante salientar que, apesar da base hidrográfica 1:50000 ser oficial do estado, ela contém imprecisões (Sousa; Sampaio, 2015). Para isso, analisou-se: a similitude entre as redes de drenagem extraídas dos três modelos a partir dos métodos MFD e SFD em relação a base hidrográfica 1:50000; e se modelo FABDEM, que em teoria não considera as elevações da vegetação e das edificações, foi capaz de representar apenas as elevações do terreno analisado e assim gerar redes de drenagem de melhor qualidade quando comparado as redes de drenagem extraídas dos demais modelos.

A análise foi focada na porção sul da planície de inundação do Rio Iapó (Figura 1C e Figura 1D). A escolha desta planície de inundação se deu devido à sua representatividade espacial, sendo a maior área plana da área de estudo e conseqüentemente a área onde a extração automática da rede de drenagem possui o potencial de apresentar maiores limitações.

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### COMPARAÇÃO ENTRE MODELOS E CÁLCULO DAS ACURÁCIAS VERTICAIS

Dentre as três comparações realizadas entre modelos, as maiores diferenças médias de elevação foram obtidas na comparação entre o FABDEM e o SRTM. Este resultado já era esperado, pois os dois modelos são oriundos de fontes de dados diferentes. Além disso, os dados do FABDEM são relativos apenas à superfície terrestre, enquanto os dados do SRTM são relativos à superfície que considera também topos de florestas e edifícios. Em contrapartida, as menores diferenças médias de elevação foram obtidas na comparação entre o COPDEM e o SRTM. Isto ocorreu pois ambos se tratam de MDEs, sendo seus dados referentes a superfície que inclui também a elevação do topo das florestas e das construções (Tabela 1).

Tabela 1 – Comparação entre os dados de elevação dos modelos

Modelo	Diferença máxima (m)	Diferença média (m)	Desvio padrão (m)
COPDEM vs SRTM	106,58	3,42	3,60
COPDEM vs FABDEM	69,05	4,00	3,80
FABDEM vs SRTM	107,54	5,39	5,07

Fonte: Os autores.

Na comparação entre os valores de declividade, a maior diferença obtida foi na comparação entre COPDEM e SRTM. Enquanto isso, a menor diferença obtida foi na comparação entre o COPDEM e o FABDEM (Tabela 2). Este é um cenário diferente do qual foi observado na comparação entre os dados de elevação.

Tabela 2 – Comparação entre os dados de declividade (em %) dos modelos

Modelo	Diferença máxima	Diferença média d	Desvio padrão
COPDEM vs SRTM	107,67	4,50	4,56
COPDEM vs FABDEM	83,41	2,42	2,91
FABDEM vs SRTM	127,27	4,44	4,51

Fonte: Os autores.

Dentre três modelos, o FABDEM foi o que apresentou o menor EQM em todas as três áreas, tanto para as elevações dos pontos cotados quanto para as elevações dos pontos de intersecção das curvas de nível com a hidrografia (Tabela 3). Sendo assim, é possível afirmar que FABDEM é o modelo analisado que possui a melhor acurácia vertical. Este resultado confirma que modelo FABDEM é o mais aproximado em relação aos dados de referência, ou seja, o mais aproximado aos dados de superfície terrestre. Isto demonstra que a remoção das superfícies de florestas e construções a partir dos dados do modelo COPDEM realizada por Hawker et al. (2022) foi significativamente bem-sucedida na área analisada. Assim, pode-se afirmar que o FABDEM, para esta região, trata-se do melhor modelo a ser utilizado, apesar de não remover completamente os efeitos da vegetação e das edificações.

Tabela 3 – Erro quadrático médio (EQM)

Comparação com as elevações dos pontos cotados

Modelo	EQM (m) (Área 1)	EQM (m) (Área 2)	EQM (m) (Área 3)
SRTM	6,11	8,61	8,93
FABDEM	5,82	6,60	7,99
COPDEM	6,44	7,45	8,25

Comparação com as elevações dos pontos de intersecção das curvas de nível com a hidrografia

Modelo	EQM (m) (Área 1)	EQM (m) (Área 2)	EQM (m) (Área 3)
SRTM	11,98	15,60	16,55
FABDEM	8,12	12,54	10,21
COPDEM	11,40	14,50	14,54

Área1: relevo de baixa/média rugosidade; Área 2: relevo de baixa rugosidade, planície de inundação; Área 3: relevo de alta rugosidade e florestada. Fonte: Os autores.

Este resultado vai ao encontro do obtido por Bielski et al. (2024) para as áreas de relevo plano e ondulado. Nestas áreas, utilizando como dados de referência a elevação de terreno adquiridos através de sensores LiDAR, o FABDEM apresentou maior qualidade de dados em comparação ao COPDEM e ao SRTM. Porém, para áreas fortemente onduladas e escarpadas, Bielski et al. (op. cit.) ranquearam dentre os três modelos o COPDEM como o de melhor qualidade, seguindo pelo FABDEM e pelo SRTM. Se tratando de áreas de floresta ou áreas sem floresta, em ambos os cenários os autores identificaram maior qualidade no modelo FABDEM, seguido pelo COPDEM e o SRTM.

Meadows, Jones e Reinke (2024), também empregando como dados de referência as elevações de terreno adquiridos por sensores LiDAR, obtiveram resultados semelhantes. O FABDEM apresentou a melhor acurácia vertical geral, independentemente do tipo do uso do solo. Quanto ao relevo, o FABDEM apresentou maior acurácia para áreas planas, enquanto o COPDEM apresentou a melhor acurácia, mas áreas declivosas sem cobertura florestal (Meadows; Jones; Reinke, op. cit.). Por sua vez, Gaida et al. (2024), usando como dados de referência as elevações medidas a partir de levantamentos topográficos com uso de receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*), identificaram que em um ambiente florestal os dados FABDEM, SRTM e Aster GDEM não apresentam diferenças estatísticas significantes. Porém, o fato dos dados altimétricos do FABDEM não apresentarem superestimacões indica que há uma menor influência do dossel florestal nas elevações representadas por este modelo.

Para as elevações dos pontos cotados, as menores acurácias verticais para todos os modelos foram calculadas na área 3, que é caracterizada por relevo fortemente ondulado e mais densamente florestada. Na outra ponta, as maiores acurácias verticais foram calculadas na área 1, que é caracterizada relevo plano ou ondulado e predomínio de plantações e pastagens. Entretanto, para as elevações dos pontos de intersecção entre as curvas de nível e a hidrografia, a menor acurácia vertical do modelo FABDEM foi calculada na área 2, caracterizada pelo relevo plano das planícies de inundação do Rio Iapó. Já a menor acurácia vertical para o modelo COPDEM foi calculada na área 3, porém com valor próximo ao calculado na área 2 (Tabela 3).

O cenário descrito acima demonstra o ganho de acurácia dos dados do modelo FABDEM, sobretudo em pontos sobre os canais fluviais localizados em áreas de relevo fortemente ondulado e densamente florestadas. Além disso, como a acurácia vertical para todos os modelos é maior nas elevações dos pontos cotados, pode-se afirmar que a acurácia vertical é maior nos divisores de água do que na rede de drenagem. Esta diferença de acurácia vertical chega a quase duas vezes, sobretudo no caso dos modelos SRTM e COPDEM. Para o modelo

FABDEM, para as áreas 1 e 2 esta diferença entre os valores de acurácia vertical é menor, abaixo de 1,5 (Tabela 4).

Tabela 4 – Diferença da acurácia vertical entre as comparações com elevações dos pontos cotados e entre as comparações com as elevações dos pontos das curvas de nível com a hidrografia

Modelo	Área 1	Área 2	Área 3
SRTM	1,96	1,81	1,85
FABDEM	1,40	1,90	1,27
COPDEM	1,77	1,95	1,76

Fonte: Os autores.

Trabalhos de Falorni et al. (2005), Mukherjee et al. (2013), Hu et al. (2017) e Tran et al. (2023) indicaram que a acurácia vertical dos modelos é menor em áreas de relevo mais declivoso do que em área de relevo plano. Cenários semelhantes a estes foram encontrados na comparação com os dados de elevação dos pontos cotados para todos os modelos, bem como na comparação com os dados de elevação dos pontos de intersecção entre curvas de nível e hidrografia para os modelos SRTM e COPDEM. Entretanto, neste último caso, a menor acurácia vertical para o modelo FABDEM foi calculada na área mais plana (área 2). Deste modo, é evidenciada a dificuldade de delimitar redes de drenagem de maneira semiautomática em áreas de planícies de inundação.

#### DELIMITAÇÃO E ANÁLISE DA QUALIDADE DAS REDES DE DRENAGEM ORIUNDAS DE DIFERENTES MODELOS GLOBAIS

Diante deste desafio, os resultados dos testes realizados a partir do uso de diferentes modelos globais e de diferentes parâmetros para a definição das direções de fluxo foram analisados focalizando a área 2, sobre a planície de inundação do Rio Iapó. As redes de drenagem foram extraídas a partir de uma acumulação mínima de fluxo de 100 pixels (90.000 m<sup>2</sup>) (Figura 2). Foi optado pelo uso deste pois o mesmo deriva uma rede de drenagem mais similar quando comparada a base hidrográfica 1:50000 do DSG/IBGE.

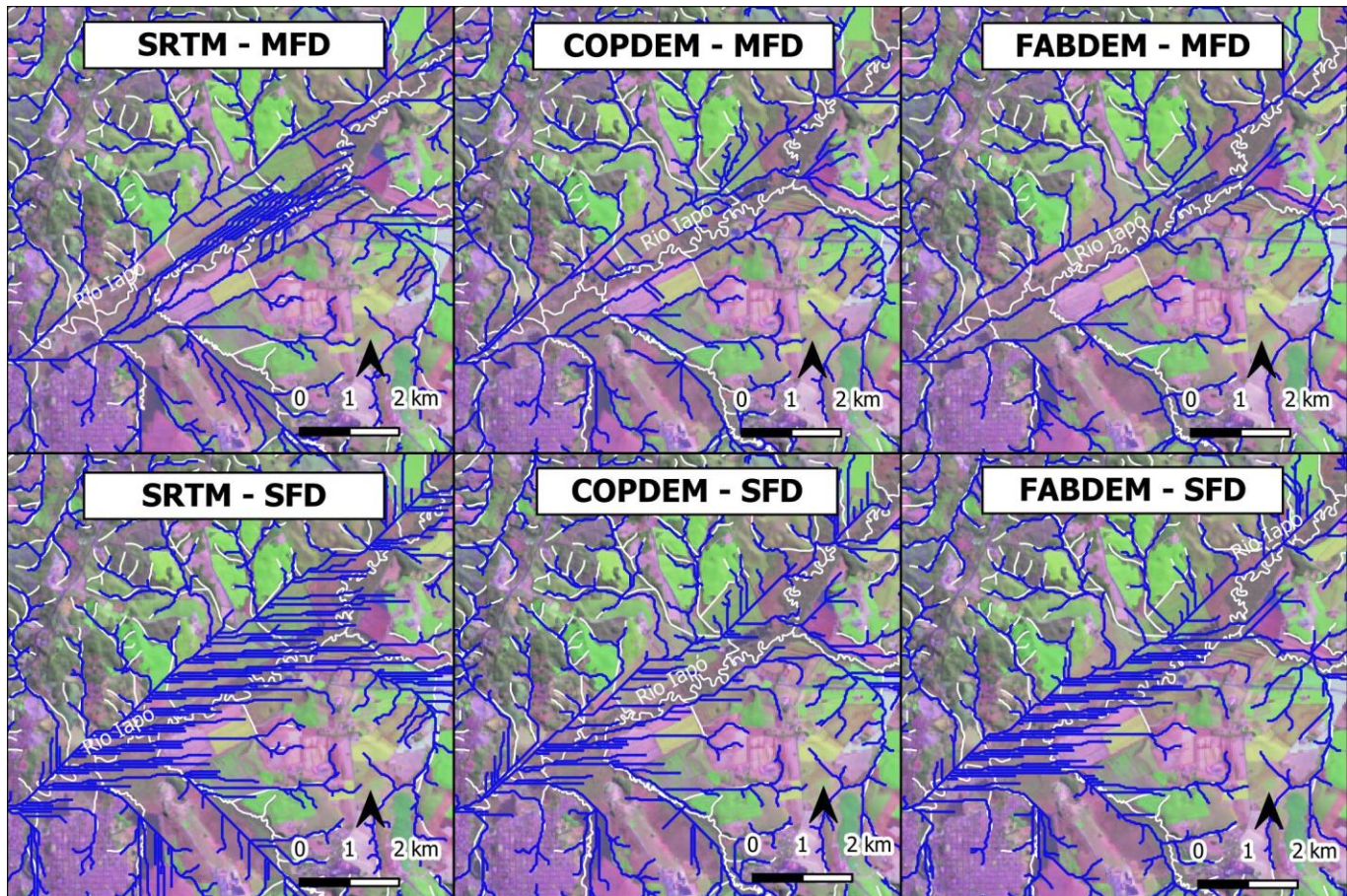


Figura 2 – Redes de drenagem delimitadas para cada modelo a partir dos métodos MFD e SFD, com acumulação mínima de fluxo de 100 pixels. As linhas azuis representam as redes de drenagem delimitadas semiautomáticamente, enquanto as linhas brancas representam a base hidrográfica do DSG/IBGE na escala 1:50000. Imagem de fundo: Landsat 8.

Na interpretação visual dos resultados de cada método de direção de fluxo, é nítido o melhor desempenho do método multifluxo (MFD) para os três modelos analisados. O método MFD é capaz de delimitar uma rede de canais sobre a planície de inundação de maneira mais próxima ao natural, onde há um canal principal conectado aos demais canais afluentes. Porém, mesmo assim, o método MFD delimitou em todos os modelos mais de um canal principal, sendo paralelos uns aos outros e confluindo na porção mais à jusante da planície de inundação. Por outro lado, o método SFD resultou em um canal principal não centralizado em relação à área da planície, bem como em vários pequenos afluentes retilinizados que cobrem toda a área da planície.

Analisando a rede de drenagem derivada do FABDEM a partir do método MFD, o canal mais centralizado foi delimitado próximo ao rio Iapó, assim como há menor presença de pequenos canais retilíneos em meio à planície. Porém, o canal centralizado está como um canal afluente, sendo o principal canal da rede delimitado mais ao norte. Cenário similar a este não ocorreu apenas com a rede de drenagem resultante do FABDEM, mas

também com as redes de drenagens resultantes do SRTM e do COPDEM. Por sua vez, as redes de drenagem delimitadas a partir do modelo SRTM apresentaram a maior presença de pequenos canais retilíneos e paralelos.

As redes de drenagem foram delimitadas a partir da acumulação de fluxo mínima de 500 pixels (Figura 3). O uso de critério de acumulação de fluxo mais alto permitiu remover os pequenos canais retilíneos e paralelos, restando na rede de drenagem apenas os canais maiores. Deste modo, é realçado que o método SFD apresenta canais mais retilíneos, bem como um único canal principal deslocado em relação ao Rio Iapó mapeado pela base do DSG/IBGE. Entretanto, para a rede de drenagem oriunda do SRTM e do FABDEM ainda há pequenos canais retilíneos sobre a planície de inundação, sendo assim necessário o emprego de um valor de acumulação de fluxo ainda maior. Isto, por consequência, acarretaria uma maior generalização dos resultados. Já para a rede oriunda do COPDEM, é realçada a delimitação de dois canais principais, um parcialmente coincidente ao Rio Iapó e outro deslocado, com ambos confluindo no ponto mais à jusante da planície de inundação.

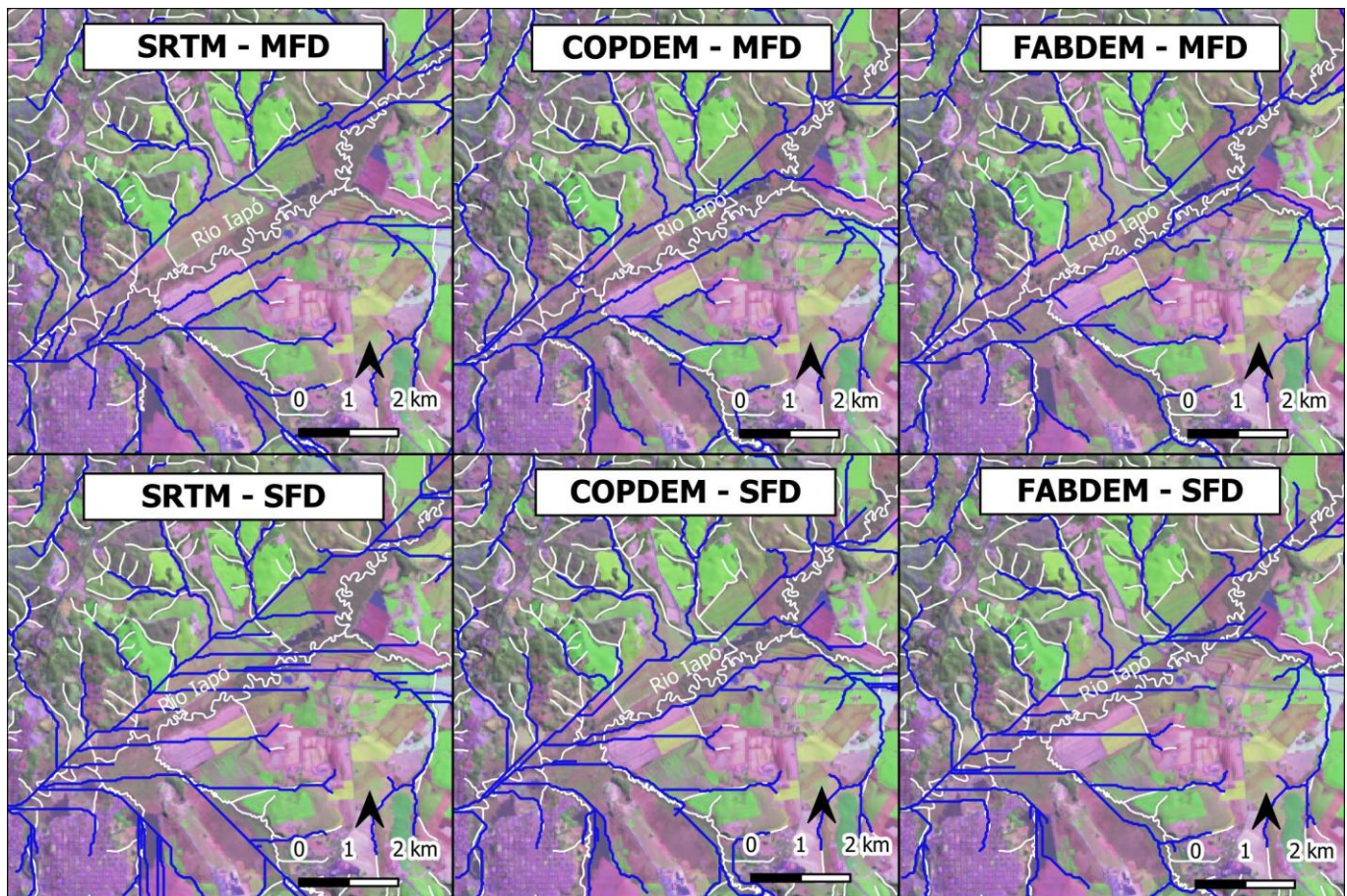


Figura 3 – Redes de drenagem delimitadas para cada modelo a partir dos métodos MFD e SFD, com acumulação mínima de fluxo de 500 pixels. As linhas azuis representam as redes de drenagem delimitadas semiautomaticamente, enquanto as linhas brancas representam a base hidrográfica do DSG/IBGE na escala 1:50000. Imagem de fundo: Landsat 8.

A Figura 4 mostra as redes de drenagem delimitadas pelo método MFD e com acumulação de fluxo mínima de 1000 pixels, conjuntamente a observações de campo. Nos exemplos abaixo, se evidencia que a rede de drenagem derivada do SRTM apresenta feições mais retilíneas (Figura 4A e Figura 4B), mesmo em áreas onde o Rio Iapó é altamente sinuoso (Figura 4A). Também se evidencia a limitação de todos os três modelos em gerar uma rede hidrológica consistente com a realidade de campo em áreas onde a vegetação de planície é mais densa e ocupa maior raio de distância em relação ao entorno do rio (Figura 4C). Esta última situação se contrasta com a situação nas áreas onde a vegetação do entorno é menos densa e ocupa menor raio de distância em relação ao entorno do rio, onde os modelos (sobretudo o COPDEM e o FABDEM) apresentam resultados mais consistentes (Figura 4B). Por fim, há trechos de rios de primeira ordem mapeados pela base topográfica e também extraídas pelos modelos não são encontrados em campo (Figura 4B), o que evidencia limitações tanto em relação às bases topográficas oficiais quanto aos métodos automatizados de extração de redes de drenagem.

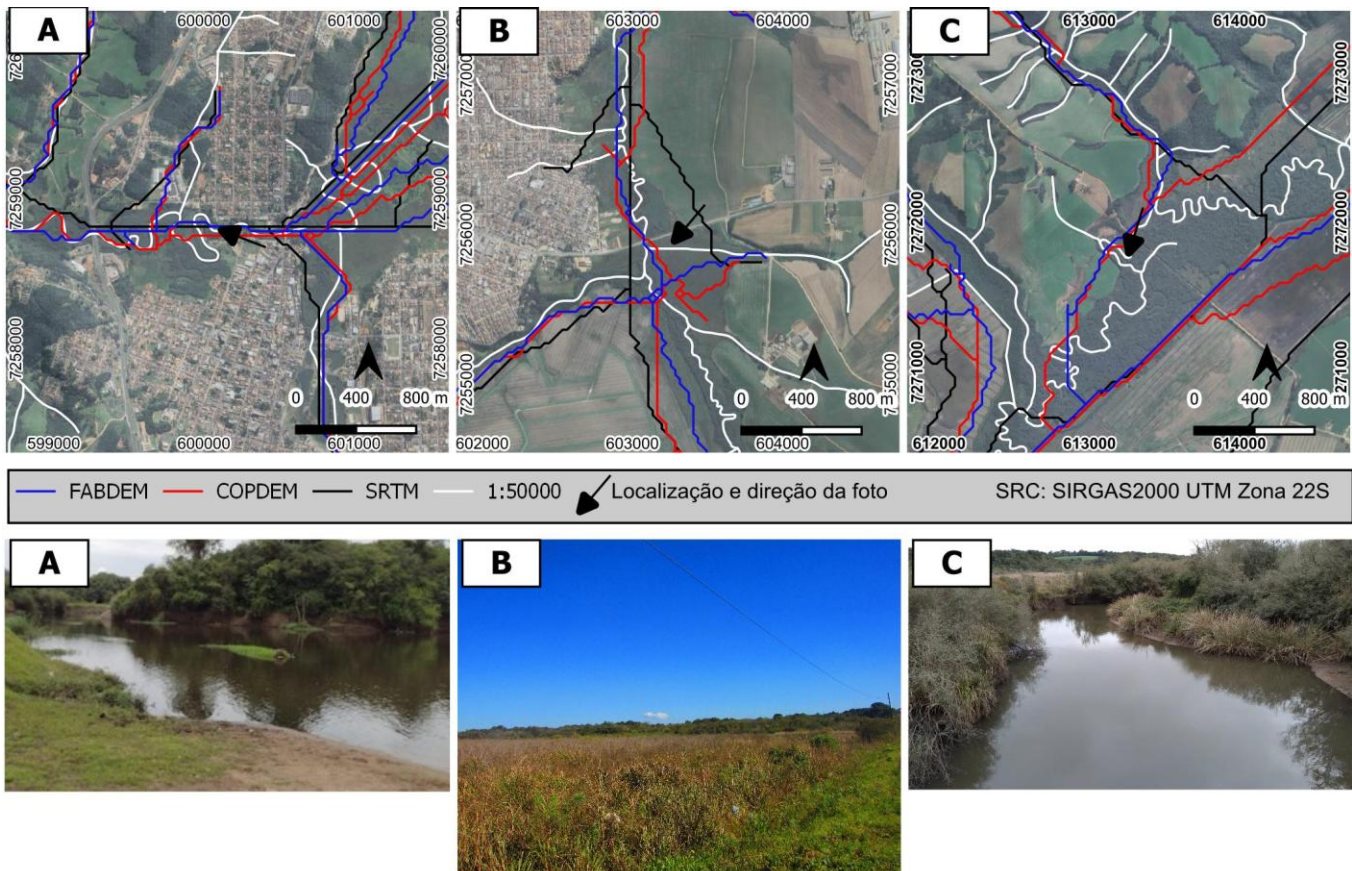


Figura 4 – A: Rio Iapó e uma ilha fluvial na altura do Parque Natural Municipal da Prainha, em Castro – PR; B: Planície fluvial do Rio Maracanã, afluente do Rio Iapó, na estrada entre a sede do município de Castro e o distrito de Castrolândia. Ao fundo da fotografia, a mata ciliar do Maracanã; C: Rio Iapó. Fotografia registrada sobre a ponte da rodovia PR-090. As redes de drenagem foram delimitadas a partir do método MFD e considerando acumulação mínima de fluxo de 1000 pixels, e as imagens de fundo são providas da base do Google Earth.

Em resumo, na comparação entre os diferentes modelos, o FABDEM, quando empregado concomitantemente ao método MFD, apresentou os melhores resultados. Este resultado vai ao encontro de Gaida et al. (2024), que identificaram que em uma área florestada a rede de drenagem derivada do FABDEM apresenta maior correspondência espacial com a drenagem existente quando comparada às redes de drenagem derivadas do SRTM e do Aster GDEM.

Para a análise da influência do dossel das florestas nos dados de elevação dos modelos testados, observa-se os perfis mostrados na Figura 5A e na Figura 5B. Estes perfis compararam as elevações dos três modelos na área da planície do rio Iapó. Sobre ela, a superfície representada pelo SRTM está sistematicamente mais elevada e plana. Como efeito disso, os principais canais da planície delimitados pelo método MFD estão localizados exatamente nas bordas das áreas planas. Enquanto isso, as superfícies representadas pelo COPDEM e pelo FABDEM se sobrepõem nas áreas onde não há vegetação, e a superfície do COPDEM está mais elevada nas áreas vegetadas. Assim, os picos de elevação dos dados COPDEM observados sobre a área da planície de inundação são referentes a porções onde há presença de vegetação. A exclusão da vegetação de planície de inundação, permitiu que o método MFD delimitasse o canal principal (no caso, o rio Iapó) mais próximo a sua real localização, sem, entretanto, evitar que fossem delimitados outros dois canais principais paralelos próximos a borda da planície.

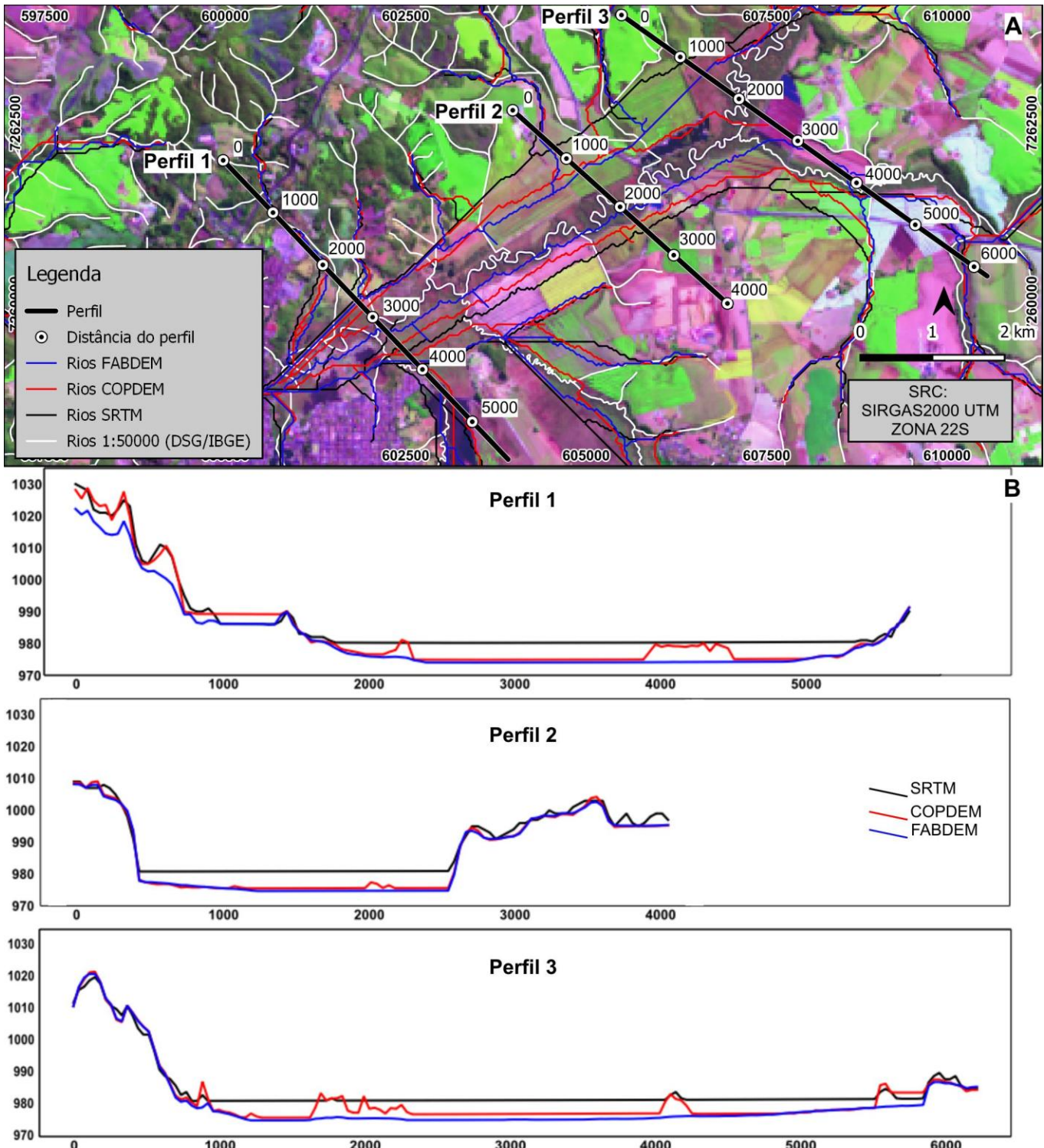


Figura 5 – A: localização dos perfis de elevação perpendiculars à porção sul da planície do rio Iapó. Os rios mostrados foram delimitados a partir do método MFD e considerando acumulação mínima de fluxo de 1000 pixels; B: perfis de elevação a partir dos dados dos modelos SRTM, COPDEM e FABDEM. Em ambas as figuras, as elevações e distâncias estão dadas em metros.

Na posição de 2000 metros do perfil 3, há a presença de vegetação de planície de inundação bem delineada pelos dados de superfície do COPDEM. Nesta mesma posição, para os dados do FABDEM, é possível

ainda observar uma pequena protuberância no terreno. Aparentemente, esta vegetação de planície de inundação pode não ter sido removida por completo no modelo FABDEM. Assim, a presença destas elevações nos perfis gerados pelos dados do COPDEM e do FABDEM ocasionaram erros na delimitação do rio Iapó na área. No caso específico da rede de drenagem oriunda do FABDEM, esta elevação não permitiu que o algoritmo de delimitação ligasse o rio Iapó ao seu trecho correspondente à montante. Deste modo, o canal paralelo localizado próximo a borda direita da planície de inundação foi ligado ao trecho do rio Iapó à montante.

Os perfis longitudinais (Figura 6) do trecho do Rio Iapó apresentado na Figura 5A também mostram que as elevações do SRTM estão sistematicamente acima das elevações dos demais modelos, enquanto as elevações do COPDEM estão sistematicamente acima das elevações do FABDEM. Os dados do modelo COPDEM apresentam mais ruídos quando comparados aos demais modelos. As elevações mais baixas e a redução nos ruídos são outra evidência de que o processamento que deu origem ao modelo FABDEM foi capaz de filtrar parte do importante da influência da vegetação em seus dados de elevação. Por outro lado, ruídos identificados nos dados FABDEM nos trechos mais à jusante e mais à montante evidenciam que em áreas onde a vegetação de planície de inundação aparenta ser mais densa e ocupa um raio maior no entorno do rio, o processo de filtragem não foi capaz de reduzir completamente a influência no dossel das florestas nos dados altimétricos.

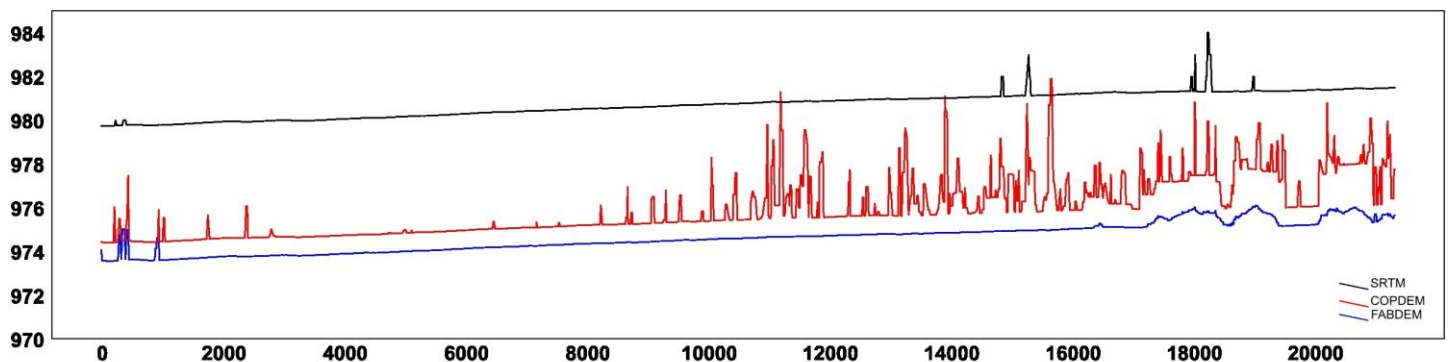


Figura 6 – Perfis longitudinais do trecho do Rio Iapó (base 1:50000) mostrado na Figura 5A, usando como base os modelos SRTM, COPDEM e FABDEM.

#### IV. CONCLUSÕES

Na comparação entre os modelos globais SRTM, COPDEM e FABDEM, o último apresentou a mais alta acurácia vertical em relação ao terreno. Os resultados quantitativos da comparação entre os três modelos obtidos neste trabalho vão ao encontro do que vem sendo obtido nos demais trabalhos que até este momento compararam o novo modelo global FABDEM a outros modelos globais.

O uso de pontos cotados e pontos de intersecção entre curvas de nível e hidrografia oriundos de cartas topográficas foi capaz de permitir o cálculo de acurácia vertical e a comparação quantitativa entre diferentes MDEs/MDTs. Apesar das suas limitações, esta metodologia se mostra como uma opção viável na comparação entre modelos em áreas onde não há a disponibilidade ou possibilidade de levantamento de dados *LiDAR*.

Através de comparação qualitativa, constatou-se a melhor qualidade da rede de drenagem gerada a partir do FABDEM em área de planície de inundação, principalmente quando empregado conjuntamente ao método multifluxo, denominado *multi-flow direction* (MFD).

A remoção parcial da vegetação de planície de inundação por parte do FABDEM permitiu delimitação mais fidedigna do rio principal, portanto o emprego desses dados apresentem delimitação mais natural quando comparadas às redes de drenagem derivadas dos modelos SRTM e COPDEM, que têm a mesma resolução espacial.

Por fim, cabe destaca que mesmo o modelo FABDEM sendo a base de dados global que apresentou o melhor resultado, foram detectados importantes limitações no seu emprego. Este cenário demonstrou o desafio encontrado no mapeamento semiautomático de redes de drenagem em áreas planas.

### Agradecimentos

Willian Bortolini agradece à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGGEO-UFPR) pela bolsa de doutorado CAPES-PROEX. Os autores também agradecem ao programa franco-brasileiro de colaboração científica (CAPES-CONFECUB) pelo seu apoio contínuo (projetos 869/15 e 981/20).

### V. REFERÊNCIAS

AHMADI, H.; DAS, A.; POURTAHERI, M.; KOMAKI, C. B.; KHAIRY, H. Redefining the watershed line and stream networks via digital resources and topographic map using GIS and remote sensing (case study: the Neka River's watershed). *Natural hazards*, v. 72, p. 711-722, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1031-9>.

BARRETO, K. T.; PINTO, M. L. C. Caracterização dos Indicadores Geomorfológicos na Bacia Hidrográfica do Rio Verde, Ponta Grossa-PR. *Geografia, Ensino e Pesquisa*. v. 21, n. 2, p. 164-173, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2236499424088>.

BIELSKI, C.; LÓPEZ-VÁZQUEZ, C.; GROHMANN, C. H.; GUTH, P. L.; HAWKER, L.; GESCH, D.; TREVISANI, S; HERRERA-CRUZ, V.; RIAZANOFF, S.; CORSEAUX, A.; REUTER, H. I.; STROBL, P. Novel approach for ranking DEMs: Copernicus DEM improves one arc second open global topography. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, v. 62, p. 1-22, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2024.3368015>.

BORGOHAIN, A.; KHAJURIA, V.; GARG, V.; KOTI, S. R.; BHARDWAJ, A. Comparison of Geomorphological Parameters Detected Using MERIT and FABDEM Products. *Environmental Sciences Proceedings*, v. 25, n. 1, p. 59, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ECWS-7-14298>..

CHEN, Q.; MUDD, S. M.; ATTAL, M.; HANCOCK, S. Extracting an accurate river network: Stream burning re-revisited. *Remote Sensing of Environment*, v. 312, p. 114333, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.114333>.

CONRAD, O.; BECHTEL, B.; BOCK, M.; DIETRICH, H.; FISCHER, E.; GERLITZ, L.; WEHBERG, J.; WICHMANN, V.; BÖHNER, J. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4, *Geosci. Model Dev.* v. 8, p. 1991-2007. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/gmd-8-1991-2015>.

COPERNICUS. Copernicus DEM – Global and European Digital Elevation Model. 2024. Disponível em: [https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/copernicus-contributing-missions/collections-description/COP-](https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/copernicus-contributing-missions/collections-description/COP-DEM#:~:text=The%20Copernicus%20DEM%20is%20a,mission%20between%202011%20and%202015)

DEM#:~:text=The%20Copernicus%20DEM%20is%20a,mission%20between%202011%20and%202015. Acesso em: setembro de 2024.

DANDABATHULA, G.; HARI, R.; GHOSH, K.; BERA, A. K.; SRIVASTAV, S. K. Accuracy assessment of digital bare-earth model using ICESat-2 photons: analysis of the FABDEM. *Modeling Earth Systems and Environment*, v. 9, n. 2, p. 2677-2694, 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s40808-022-01648-4>

DUARTE, T. F.; STEFANES, M.; BRONAUT, R. P. M.; FINAZZI, A. E. M. Extração automática de drenagem utilizando dados SRTM da sub-bacia do Ribeirão Laranjal Nova Andradina/MS. In: 27º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2013, Goiânia (GO). Anais Eletrônicos [...]. Goiânia (GO), Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES), 2013. Disponível em: [https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/22\\_Download/TrabalhosCompletoPDF/IV-139.pdf](https://abes-dn.org.br/anaiseletronicos/22_Download/TrabalhosCompletoPDF/IV-139.pdf).

EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. Digital terrain modeling: acquisition, manipulation, and applications. Artech House Inc., Norwood-Massachusetts, 2005.

FALORNI, G.; TELES, V.; VIVONE, E. R.; BRAS, R. L.; AMARATUNGA, K. S. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2003JF000113>.

FERREIRA, F. J. F. Integração de dados aeromagnéticos e geológicos: configuração e evolução tectônica do Arco de Ponta Grossa. 1982. Dissertação (Mestrado em Geologia). Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo. 169 p. 1982.

FIRMINO, I. Identificação de anomalias de drenagem na bacia do rio Sabão (PR) por meio do índice RDE e do Fator de Simetria Topográfica Transversal (FSTT). *Bol. geogr.* v. 33, número especial, p. 61-73, 2015. Disponível em: <http://doi.org/10.4025/bolgeogr.v33i0.31927>.

FIRMINO, I. G. SOUZA FILHO, E. E. Análise de padrões e de anomalias de drenagem da porção média da bacia do rio Tibagi (PR). *Revista Brasileira de Geomorfologia.* v.18, n.1, p.37-49, 2017. Disponível em: <http://doi.org/10.4025/bolgeogr.v33i0.31927>.

GAIDA, W.; ERTHAL, D. A.; BREUNIG, F. M., SAMPAIO, T. V. M.; SPOHR, R. B. Avaliação de modelos digitais de elevação para análise hidrológica em ambientes florestais: estudo de caso do Parque Estadual do Turvo, Rio Grande do Sul. *Geografia Ensino & Pesquisa*, v. 28, p. e85914-e85914, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5902/2236499485914>.

GIANNONI, F.; ROTH, G.; RUDARI, R. A procedure for drainage network identification from geomorphology and its application to the prediction of the hydrologic response. *Advances in Water Resources*, v. 28, n. 6, p. 567-581, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2004.11.013>.

GRASS Development Team, 2017. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.2. Open Source Geospatial Foundation. Electronic document: <http://grass.osgeo.org>

HACK, J. T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Jour. Research U.S. Geol. Survey*. v. 1, n. 4, p. 421-429, 1973.

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. Disponível em: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4d4f>.

HENGL, T.; MACMILLAN, R. A. Geomorphometry—a key to landscape mapping and modelling. *Developments in Soil Science*, v. 33, p. 433-460, 2009.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Bulletin of the Geological Society of America*. v. 56, p. 275-370, 1945. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/030913339501900406>.

HU, Z.; PENG, J.; HOU, Y.; SHAN, J. Evaluation of recently released open global digital elevation models of Hubei, China. *Remote Sensing*, v. 9, n. 3, p. 262, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/rs9030262>

IQBAL, A.; MONDAL, M. S.; VEERBEEK, W.; KHAN, M. S. A.; HAKVOORT, H. Effectiveness of UAV-based DTM and satellite-based DEMs for local-level flood modeling in Jamuna floodplain. *Journal of Flood Risk Management*, v. 16, n. 4, p. e12937, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/jfr3.12937>.

KIDNER, D. B.; SMITH, D. H. Advances in the data compression of digital elevation models. *Computers & Geosciences*, v. 29, n. 8, p. 985-1002, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(03\)00097-9](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(03)00097-9).

KRDŽALIĆ, D.; ĆATIĆ, J.; VRCE, E.; OMIĆEVIĆ, D. Evaluating the accuracy of the digital elevation models (DEMs) within the territory of Bosnia and Herzegovina. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, v. 34, p. 101187, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101187>.

LAKSHMI, S. E.; YARRAKULA, K. Review and critical analysis on digital elevation models. *Geofizika*, v. 35, n. 2, p. 129–157-129–157, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.15233/gfz.2018.35.7>.

LINDSAY, J. B.; YANG, W.; HORNBY, D. D. Drainage network analysis and structuring of topologically noisy vector stream data. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 8, n. 9, p. 422, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijgi8090422>.

MEADOWS, M.; JONES, S.; REINKE, K. Vertical accuracy assessment of freely available global DEMs (FABDEM, Copernicus DEM, NASADEM, AW3D30 and SRTM) in flood-prone environments. *International Journal of Digital Earth*, v. 17, n. 1, p. 2308734, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17538947.2024.2308734>.

MINEROPAR – Minerais do Paraná S/A. Atlas geológico do estado do Paraná. 116 p. Curitiba, 2001.

MINEROPAR – Minerais do Paraná S/A. Mapa Geológico do Estado do Paraná -Cartas Geológicas 1:250.000. 2006. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Mapeamento-Geologico>.

MUKHERJEE, S.; JOSHI, P. K.; MUKHERJEE, S.; GHOSH, A.; GARG, R. D.; MUKHOPADHYAY, A. Evaluation of vertical accuracy of open source Digital Elevation Model (DEM). *International Journal of Applied Earth Observation and*

Geoinformation, v. 21, p. 205-217, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.09.004>.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. Shuttle Radar Topography Mission (SRTM). 2024. Disponível em: <https://www.earthdata.nasa.gov/sensors/srtm>. Acesso em: setembro de 2024.

OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C.; CANALI, N. E.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, C. T.; BRISKI, S. J.; FELIPE, R. S.; SILVA, J. M. F.; ROSS, J. L. S. Atlas Geomorfológico do Estado do Paraná: escala base 1:250.000, modelos reduzidos 1:500.000. MINEROPAR; Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 63 p., 2006.

OLIVEIRA, K. A.; PINTO, M. L. C. Correlação morfoestrutural da rede de drenagem na bacia do Alto Curso do rio Pitangui – Paraná. Geoinf: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia. v. 7, n.1, p. 25-41, 2015. Disponível em: <http://doi.org/10.4025/geoinf.v7i1.49291>.

PERRON, J.; ROYDEN, L. An integral approach to bedrock river profile analysis. Earth Surface Processes and Landforms. v. 38, p. 570-576, 2013. Disponível em: <http://doi.org/10.1002/esp.3302>.

PIKE, R. J.; EVANS, I. S.; HENGL, T. Geomorphometry: a brief guide. Developments in soil science, v. 33, p. 3-30, 2009. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(08\)00001-9](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)00001-9).

SANTOS, L. J. C.; OKA-FIORI, C.; CANALI, N. E.; FIORI, A. P.; DA SILVA, C. T.; DA SILVA, J. M. F.; ROSS, J. L. S. Mapeamento geomorfológico do Estado do Paraná. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 7, n. 2, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v7i2.74>.

SCHWANGHART, W.; SCHERLER, D. TopoToolbox 2—MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences. Earth Surface Dynamics, v. 2, n. 1, p. 1-7, 2014. Disponível em: <http://doi.org/10.5194/esurf-2-1-2014>.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T. Análise comparativa entre modelos digitais de elevação com distintas características de processamento e aquisição. Boletim de Geografia, v. 33, p. 106-121, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.4025/bolgeogr.v33i0.31930>.

SNYDER, N. P.; WHIPPLE, K. X.; TUCKER, G. E.; MERRITTS, D. J. Landscape response to tectonic forcing: Digital elevation model analysis of stream profiles in the Mendocino triple junction region, northern California. GSA Bulletin. v. 112, n. 8, p. 1250-1263, 2000. Disponível em: [http://doi.org/10.1130/0016-7606\(2000\)112<1250:LRTTFD>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1130/0016-7606(2000)112<1250:LRTTFD>2.0.CO;2).

SOUSA, M. S.; SAMPAIO, T. V. M. Avaliação da acurácia de bases cartográficas: um estudo de caso da rede de drenagem do estado do Paraná na escala 1:50.000 para a carta MI 2818-4. Anais... XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, João Pessoa-PB, Brasil, 25 a 29 de abril de 2015, INPE, [s. l.], n. 1, pp. 6381–6388, 2015.

TRAN, T. N. D.; NGUYEN, B. Q.; VO, N. D.; LE, M. H.; NGUYEN, Q. D.; LAKSHMI, V.; BOLTEN, J. D. Quantification of global Digital Elevation Model (DEM)—A case study of the newly released NASADEM for a river basin in Central Vietnam. Journal of Hydrology: Regional Studies, v. 45, p. 101282, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101282>.

ZALÁN, P. V.; OLIVEIRA, J. A. B. Origem e evolução estrutural do Sistema de Riftes Cenozóicos do Sudeste do Brasil. Boletim de Geociências da PETROBRAS, v. 13, n. 2, p. 269-300, 2005.

ZALÁN, P. V.; WOLFF, S.; CONCEIÇÃO, J. C.; ASTOLFI, M. A. M.; VIEIRA, I. S.; APPI, V. T.; ZANOTTO, O. A. Tectônica e sedimentação do Bacia do Paraná. Atas do III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia. Curitiba. v. 1, p. 441-477, 1987.