

## Dossiê Parque Estadual do Turvo (PET) - Yucumã

# Avaliação de modelos digitais de elevação para análise hidrológica em ambientes florestais: estudo de caso do Parque Estadual do Turvo, Rio Grande do Sul

Evaluation of digital elevation models for hydrological analysis in forest environments: a case study of the Parque Estadual do Turvo, Rio Grande do Sul

Evaluación de modelos digitales de elevación para análisis hidrológicas en ambientes florestales: estudio de caso en el Parque Estadual do Turvo, Rio Grande do Sul

**William Gaida<sup>I</sup> , Daniele Arendt Erthal<sup>III</sup> , Fábio Marcelo Breunig<sup>I e II</sup> ,  
Vinicius Moreira Sampaio<sup>III</sup> , Renato Beppler Spohr<sup>I</sup> **

<sup>I</sup> Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, RS, Brasil

<sup>III</sup> CMPC Celulose Riograndense LTDA, Guaíba, RS, Brasil

<sup>II</sup> Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil

## RESUMO

Os modelos digitais de elevação mostram-se eficientes na obtenção de medidas altimétricas do terreno, porém, em áreas florestais, a eficácia é reduzida pela interferência do dossel. Este estudo objetivou avaliar o desempenho de três modelos digitais de elevação na extração da rede de drenagem do Parque Estadual do Turvo. Assim, realizou-se a aquisição dos modelos FABDEM, SRTM e ASTER GDEM, juntamente com medidas obtidas por levantamento topográfico como referência de campo. As medidas altimétricas foram analisadas graficamente e estatisticamente para caracterizar o erro vertical de cada modelo. Os resultados indicaram diferenças na precisão vertical dos modelos devido à sensibilidade ao dossel, embora testes estatísticos não tenham revelado significância estatística. As maiores discrepâncias ocorreram em áreas de vales com declividade acentuada, de difícil acesso para a obtenção de dados topográficos. O delineamento da rede de drenagem mostrou que ambos os modelos conseguem distinguir os canais principais, embora os modelos ASTER GDEM e SRTM apresentem imprecisões espaciais. O modelo FABDEM destacou-se pela maior correspondência espacial com a rede de drenagem existente na área do parque.

**Palavras-chave:** Recursos florestais; Topografia; Sensoriamento remoto

## ABSTRACT

Digital elevation models have proven efficient in obtaining altimetric measurements of the terrain; however, in forested areas, their effectiveness decreases by canopy interference. This study aimed to assess the performance of three digital elevation models in extracting the drainage network of Parque Estadual do Turvo. The acquisition included FABDEM, SRTM, and ASTER GDEM models, alongside measurements obtained through topographic survey as field reference. Altimetric measurements were graphically and statistically analyzed to characterize the vertical error of each model. The results indicated differences in vertical precision due to canopy sensitivity, although statistical tests did not reveal statistical significance. The greatest discrepancies occurred in valley areas with steep slopes, challenging for topographic data acquisition. Drainage network delineation showed that all models effectively distinguish main channels, although ASTER GDEM and SRTM models exhibit higher spatial inaccuracies. The FABDEM model was highlighted because of its greater spatial correspondence with the existing drainage network in the park area.

**Keywords:** Forest resources; Topography; Remote sensing

## RESUMEN

Los modelos digitales de elevación se han mostrado eficientes en la obtención de medidas altimétricas del terreno; sin embargo, en áreas forestales, la eficacia se ve reducida por la interferencia del dosel. Este estudio tuvo como objetivo evaluar el rendimiento de tres modelos digitales de elevación en la extracción de la red de drenaje del Parque Estatal do Turvo. Para ello, se adquirieron los modelos FABDEM, SRTM y ASTER GDEM, junto con medidas obtenidas mediante levantamiento topográfico como referencia de campo. Las medidas altimétricas se analizaron gráficamente y estadísticamente para caracterizar el error vertical de cada modelo. Los resultados indicaron diferencias en la precisión vertical de los modelos debido a la sensibilidad al dosel, aunque los tests estadísticos no revelaron significancia estadística. Las mayores discrepancias se observaron en áreas de valles con pendientes pronunciadas, de difícil acceso para datos topográficos. El delineamiento de la red de drenaje mostró que ambos modelos pueden distinguir eficazmente los canales principales, aunque los modelos ASTER GDEM y SRTM presentan imprecisiones espaciales. El modelo FABDEM se destacó por su mayor correspondencia espacial con la red de drenaje existente en el área del parque.

**Palabras-clave:** Recursos forestales; Topografía; Teledetección

## INTRODUÇÃO

O relevo de regiões florestais desempenha um papel significativo na modulação de diversos fatores intrínsecos ao seu desenvolvimento em uma escala local. Estes fatores compreendem a composição química do solo, a hidrologia e o microclima (Chadwick; Asner, 2016; Xia *et al.*, 2016), os quais, por sua vez, exercem controle sobre a distribuição de espécies, influenciando de maneira direta a estrutura e a composição do ecossistema florestal (Anderse *et al.*, 2014; Werner; Homeier, 2015).

No entanto, a aquisição de medidas altimétricas do terreno de áreas florestais com uso de técnicas de topografia convencional, mostra-se inviável ou financeiramente onerosas, devido a elevada densidade de vegetação. Neste cenário, a utilização de modelos digitais de elevação, derivados de produtos orbitais, mostra-se uma alternativa viável para a modelagem do terreno, viabilizando a condução de análises morfométricas avançadas (Jucker *et al.*, 2018; Sahoo; Jain, 2018; Muscarella *et al.*, 2019; Gonzáles-Moradas; Viveen, 2020).

No entanto, em aplicações voltadas a áreas florestais, a estrutura e densidade do dossel florestal pode afetar substancialmente a precisão vertical dos modelos digitais de elevação, resultando em medidas altimétricas que não refletem adequadamente as características do terreno (O’loughlin *et al.*, 2016; Li *et al.*, 2023). Essa limitação compromete a utilização desses dados em aplicações complexas, tais como estudos de hidrodinâmica e morfometria de bacias hidrográficas (Woodrow *et al.*, 2016; Moges *et al.*, 2023). Mesmo os modelos derivados de dados obtidos por radares de abertura sintética (SAR), com menor sensibilidade a presença de vegetação, podem apresentar imprecisões na resolução vertical, devido à interferência causada pela estrutura do dossel florestal (Grohmann, 2018; Schlund *et al.*, 2019).

Neste contexto, diversos modelos digitais de elevação têm sido propostos, empregando distintas técnicas de sensoriamento remoto e/ou fotogrametria, com o propósito de desenvolver dados capazes de representar de forma precisa o gradiente vertical da superfície terrestre. Todavia, é fundamental ponderar as limitações associadas a esses tipos de dados, que podem variar significativamente em termos de acurácia vertical, dependendo da aplicação específica a que se destinam (Sahoo e Jain, 2018). Vários estudos têm sido conduzidos com o intuito de analisar a precisão vertical e identificar as restrições inerentes a cada um desses modelos, como evidenciado em pesquisas conduzidas por Ni *et al.* (2015), Su *et al.* (2015), Liang *et al.* (2018), Uuemaa *et al.* (2020), Preety *et al.* (2022) e Li *et al.* (2023). Além disso, técnicas baseadas em levantamentos com veículos aéreos não tripulados (VANTs), LiDAR e dados de pós-processamento cinemático têm mostrado a limitação ao avaliar áreas florestais densas, com potencial em áreas de

vegetação esparsa (Hung *et al.*, 2018; Neuman *et al.*, 2018; Sampaio, Rocha, 2021).

Dentre os modelos digitais de elevação amplamente empregados na pesquisa voltada para a modelagem da superfície terrestre, merece destaque o *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) (Farr *et al.*, 2007). Este modelo é derivado de observações altimétricas obtidas através de um sistema de radar interferométrico de abertura sintética orbital, com coleta de dados na faixa de frequência da banda C, caracterizada por um comprimento de onda de 5,60 cm (Farr *et al.*, 2007). Ressalta-se que esta frequência de radar é sensível à áreas cobertas por densas coberturas florestais, resultando, conseqüentemente, em imprecisões na determinação da altimetria do terreno. Em tais circunstâncias, os valores altimétricos gerados pelo SRTM refletem, predominantemente, a altura média do dossel arbóreo na área de cada pixel (Muños *et al.*, 2013). Conforme estudos conduzidos por Rodrigues *et al.* (2006), o modelo SRTM apresenta uma acurácia vertical absoluta entre 5,60 e 9,00 metros (Rodrigues *et al.*, 2006).

Outro modelo bastante utilizado em estudos de modelagem topográfica é o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model* (ASTER GDEM) (Abrams *et al.*, 2010). Atualmente disponibilizado em sua terceira versão, este modelo digital de elevação é obtido a partir de dados ópticos, com a obtenção das medidas altimétricas realizada por meio de técnica de estereoscopia, com uso de duas bandas da região do infravermelho próximo, obtidas a partir de visadas ao nadir e off-nadir (Souz; Matricardi, 2013). A sua acurácia vertical absoluta em áreas de solo sem cobertura apresenta-se representativa. No entanto, em áreas florestais, a sua precisão mostra-se limitada devido a detecção do dossel e de outros efeitos decorrentes, como a obstrução do sinal por sombreamento e a presença de artefatos.

Visando atenuar os efeitos provocados pelos elementos existentes sobre a superfície terrestre, Hawker *et al.* (2022) propuseram o *Forest And Building removed Copernicus DEM* (FABDEM). Este modelo, derivado do produto *Copernicus GLO 30 Digital Surface Model* (que é categorizado como um modelo digital de superfície, apresentando imprecisões associadas à presença de edificações e vegetação), é obtido a partir de uma nova metodologia para a eliminação de artefatos presentes nos modelos digitais de

elevação, a qual utiliza a aplicação de técnicas de aprendizado de máquina para remover as contribuições da vegetação (Hawker *et al.*, 2022).

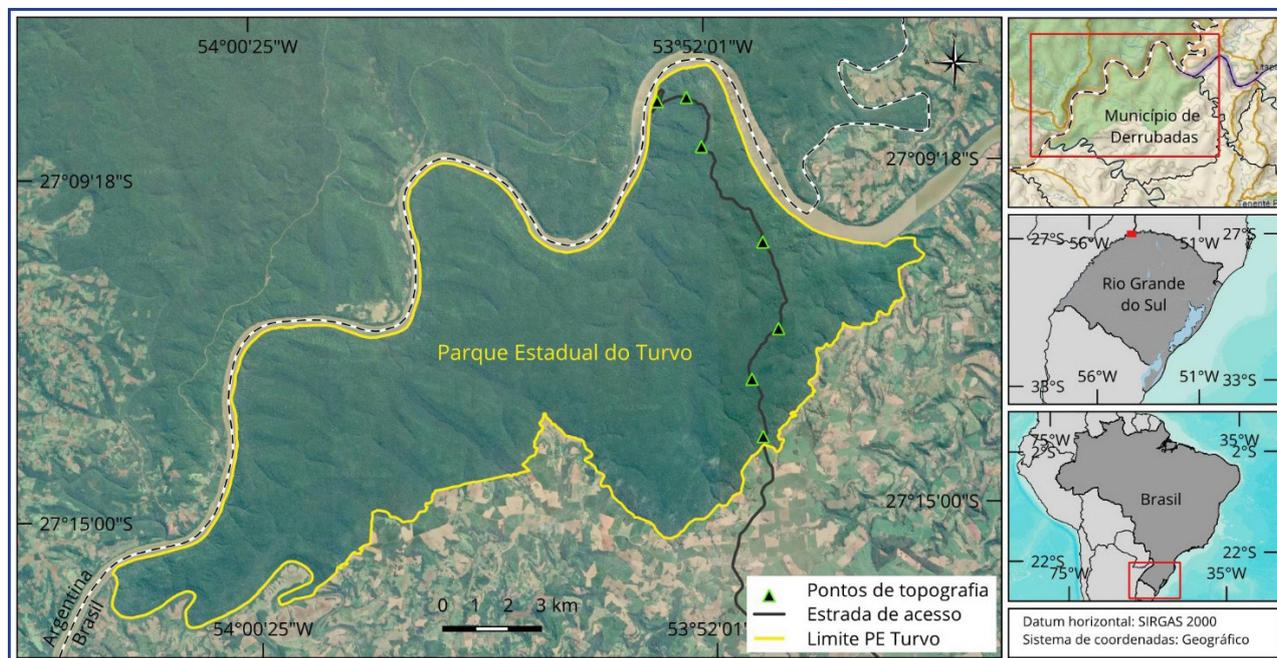
Diante do exposto, este estudo tem como objetivo avaliar a precisão vertical do modelo FABDEM na obtenção de medidas altimétricas do terreno no Parque Estadual do Turvo, em comparação com os modelos tradicionais como o ASTER GDEM v2 e SRTM v3, que foram previamente utilizados em estudos de modelagem topográfica dessa área florestal. A avaliação da acurácia vertical do FABDEM desempenha um papel fundamental na determinação da precisão das medições altimétricas obtidas nesse contexto, o que se revela de extrema importância para a realização de análises precisas das características geomorfológicas e hidrológicas das bacias hidrográficas localizadas sob a cobertura florestal do parque. Este estudo representa uma contribuição significativa para o aprimoramento das informações relacionadas à modelagem topográfica e, por conseguinte, contribui para uma compreensão mais aprofundada dos processos de drenagem e escoamento superficial observados nesse ambiente. A escolha desses modelos está relacionada aos princípios gerais utilizados para a geração do modelo de elevação, que difere nos três casos.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Área de estudo

O Parque Estadual do Turvo é uma unidade de conservação de proteção integral que se destaca como o maior fragmento preservado de floresta estacional decidual na Região Sul do Brasil (Sema, 2005). Ele se estende a partir da Floresta de Misiones, localizada na margem direita do Rio Uruguai, na Argentina (Guadagnin, 1994; Bulfe, 2008). Com uma área de 174,91 quilômetros quadrados, definida pelo Decreto nº 17.432, de 11 de agosto de 1965 (RIO GRANDE DO SUL, 1965), o parque está situado no município de Derrubadas, na região noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, conforme apresentado no mapa da Figura 1. Foi criado pelo Decreto Estadual nº 2.312, de 11 de março de 1947 (Sema, 2005). Segundo o IBGE (1986), aproximadamente 56,00% da área remanescente de floresta subtropical decídua do Estado está abrigada nessa unidade.

Figura 1 – Mapa de localização do Parque Estadual do Turvo, considerando a sua localização no sul do Brasil, no estado do Rio Grande do Sul e no município de Derrubadas



Fonte: Autores (2023)

O Parque Estadual do Turvo faz parte da unidade de relevo denominada Planalto de Santo Ângelo, que está integrada à Região Geomorfológica Planalto das Missões, a qual pertence ao domínio morfoestrutural das bacias e coberturas sedimentares. A região apresenta um relevo heterogêneo, sendo predominantemente composto por colinas suaves e arredondadas localizadas nas partes central e sul do Parque. Nessa área, há um aumento gradual da declividade em direção ao Rio Uruguai (SEMA, 2005) e ao longo dos principais cursos de água, onde se encontram encostas íngremes associadas aos vales. Essas encostas estão entalhadas sobre os derrames basálticos da Formação Serra Geral. Como resultado, ocorre uma notável distinção entre as classes de solos que se desenvolvem nas diferentes fases do relevo (SEMA, 2005; Gaida *et al.*, 2016).

## 2.2 Aquisição e processamento de dados altimétricos

Os modelos digitais de elevação ASTER GDEM e SRTM foram adquiridos por meio da plataforma de distribuição de dados Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples (AppEEARS), disponibilizada pelo *NASA's Earth Observing Data*

*and Information System (EOSDIS) Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC)*, no endereço eletrônico: <<https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appears/>>. Enquanto que o modelo FABDEM v1-2 foi adquirido a partir do repositório de dados espaciais da University of Bristol, disponível no endereço eletrônico: <[www.data.bris.ac.uk/data](http://www.data.bris.ac.uk/data)>. Todos os modelos digitais de elevação foram adquiridos no formato de dados raster, onde cada pixel contém o valor médio da elevação encontrada em uma área de 900 metros quadrados, conforme a resolução espacial desses (30 por 30 metros). Ambos os dados foram reprojatados para sistema de coordenadas plano, visando facilitar os processamentos computacionais e obtenção de dados em escala métrica.

Para analisar o aspecto altimétrico representado em cada modelo e sua relação com os elementos acima da superfície do terreno, foram adquiridas medidas de elevação do terreno em 17 pontos, por meio de levantamento topográfico com uso de receptores GNSS Topcon, modelo GR3, de dupla frequência, ao longo da estrada que atravessa a área do parque em direção ao Salto do Yucumã. O tempo médio de ocupação de cada ponto foi de 15 minutos e a precisão média horizontal obtida foi de 0,184 metros (desvio padrão de 0,292 metros) e na vertical de 0,147 metros (com desvio padrão de 0,171 metros). Todos os pontos de controle foram ajustados a partir de um ponto de base ocupado por um receptor GNSS de dupla frequência da marca Trimble, modelo 5700, instalado na entrada do Parque Estadual do Turvo. O tempo de ocupação do ponto de base foi de 7 horas e sua posição foi ajustada utilizando-se o serviço de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), disponibilizado on-line pelo IBGE e como resultado obteve-se uma precisão horizontal de 0,006 m e vertical de 0,016 m.

### **2.3 Análise dos dados altimétricos**

Considerando que o modelo FABDEM foi proposto como uma alternativa para eliminar os efeitos da presença de objetos sobre a superfície na representação de medidas altimétricas, a análise das diferenças entre este e os demais modelos avaliados foi realizada. Desta forma, os valores de altimetria encontrados no FABDEM foram subtraídos dos modelos ASTER GDEM v3 e SRTM v3. Os valores resultantes

foram analisados a partir da elaboração de mapas de diferença e perfil topográfico.

Os pontos de coleta das medições altimétricas em campo serviram como base para a criação de um arquivo vetorial (formato *shapefile*), que foi então empregado para extrair os valores altimétricos de cada um dos modelos avaliados. Estes valores foram submetidos a uma análise estatística com o propósito de avaliar as similaridades e diferenças entre os modelos e os dados de campo. A análise foi realizada por meio do teste de Kruskal-Wallis, uma vez que análises prévias indicaram que os dados não apresentam distribuição normal. A identificação das semelhanças e disparidades entre as medias altimétricas foi efetuada por meio de análise comparativa entre grupos, por meio do teste de comparações múltiplas de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner. Todas as análises estatísticas foram conduzidas considerando-se um nível de confiança de 95%.

A partir dos valores amostrados foram conduzidas análises de métricas de qualidade. Desta forma, o erro médio quadrático (*Root Mean Squared Error – RMSE*) e viés ou erro médio (bias), foram calculadas com uso das Equações 1 e 2, respectivamente. O erro médio quadrático permitiu identificar o grau de precisão vertical apresentado pelos modelos analisados em relação aos dados de campo. Enquanto que a partir das medidas de viés foi identificada a tendência sistemática de um modelo em superestimar ou subestimar os valores reais. Cabe destacar que futuros estudos podem avaliar o uso de percentis para avaliar a qualidade dos dados em área onde os resíduos podem não apresentar normalidade (recomendação disponível no relatório da American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS): ASPRS Accuracy Standards for Digital Geospatial Data).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MDE_i - Campo_i)^2} \quad (1)$$

Onde: N é o número dos pontos de controle, MDE<sub>i</sub> são os valores encontrados nos modelos digitais de elevação, enquanto que Campo<sub>i</sub> corresponde aos valores de elevação considerados verdade de campo

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MDE_i - Campo_i) \quad (2)$$

## 2.4 Delineamento da rede de drenagem

A avaliação da eficácia dos modelos digitais de elevação na extração da rede de drenagem no Parque Estadual do Turvo foi realizada a partir de uma análise comparativa entre os dados obtidos e a rede de drenagem pré-existente. Para estabelecer uma referência de campo confiável, foi adotada uma rede de drenagem em formato vetorial proveniente das cartas topográficas em escala 1:50.000, elaboradas pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG) e disponibilizada pelo Laboratório de Geoprocessamento do Centro de Ecologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Hasenack; Weber, 2010). Apesar de ser a rede oficial, cabe destacar que essas redes podem apresentar erros (Souza, Sampaio, 2015). Dada a extensão do parque, as informações de drenagem foram obtidas a partir das cartas topográficas SG21-Z-D-III-2 (Aparecida e Porto Garcia), SG21-Z-D-III-4 (Crissiumal), SG22-Y-C-I-1 (Aparecida e Porto Garcia) e SG22-Y-C-I-3 (Três Passos). A rede de drenagem derivada das cartas topográficas foi sobreposta a uma imagem de satélite de alta resolução para a identificação de eventuais limitações e inconsistências nos dados, bem como para avaliar sua abrangência e precisão na representação dos principais cursos de água que drenam a área interna do parque.

A partir dos modelos digitais de elevação procedeu-se a extração da rede de drenagem a partir da definição da direção de fluxo e fluxo acumulado, sendo adotados os mesmos limiares para os três modelos analisados. As redes de drenagem foram transformadas em arquivos vetoriais de linha (em formato *ESRI Shapefile*), sendo sobrepostos ao arquivo de referência para análise das similaridades e diferenças. A análise espacial da diferença foi realizada com uso da ferramentas de avaliação de sobreposição e proximidade (*Buffer Overlay Statistics*), disponível no sistema de informações geográficas QGIS (Sherman, 2002), sendo baseada em distâncias ou *buffers* a partir dos canais de referência, conforme metodologia descrita por Tveite e

Langaas (1999). Destaca-se que para a realização das análises foi considerada uma margem de 30 metros como sobreposição, devido a resolução espacial dos modelos digitais de elevação.

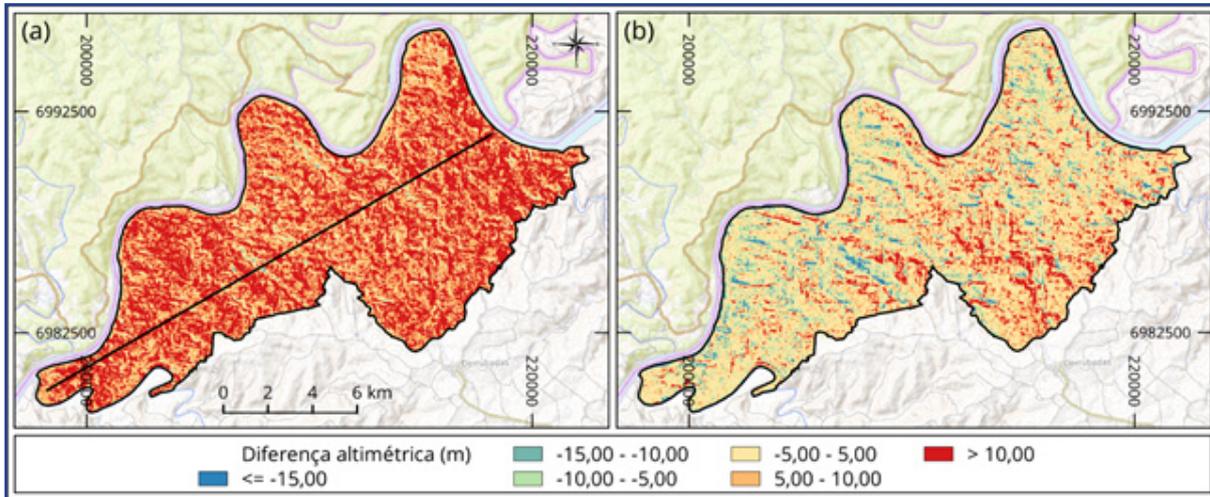
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Análise da precisão vertical dos modelos digitais de elevação

Ao serem comparadas as diferenças altimétricas dos modelos SRTM e ASTER GDEM em relação ao modelo FABDEM, observa-se que para a área do Parque Estadual do Turvo, o modelo ASTER GDEM apresentou uma maior proximidade com as altitudes apresentadas no FABDEM, como pode ser verificado na Figura 2b. A diferença máxima encontrada entre esses dois modelos foi de 19,81 metros. Em contraste, a diferença entre o modelo FABDEM e o SRTM é superior a vinte metros em grande parte da área do parque, como apresentado na Figura 2a.

No entanto, em algumas áreas, o ASTER GDEM apresentou diferenças de até quatorze metros em relação ao FABDEM, com as altitudes do primeiro modelo sendo inferiores às do último. Este comportamento pode ser atribuído à influência do fator topográfico de iluminação e à geometria de visada do sistema sensor (sombra). Essas áreas correspondem a fundos de vales pouco expostos a iluminação, caracterizados por uma baixa radiância. Este comportamento ocorre devido ao efeito topográfico condicionar o sombreamento dessas áreas, o que resulta na redução da resposta espectral em dados ópticos, como descrito por Gaida *et al.* (2016), o que faz com que o modelo ASTER GDEM não represente de forma precisa as formas do relevo, como destacado por Grohmann (2018).

Figura 2 – Diferenças altimétricas encontradas entre (a) os modelos digitais de elevação SRTM v3 e FABDEM, e (b) ASTER GDEM v3 e FABDEM

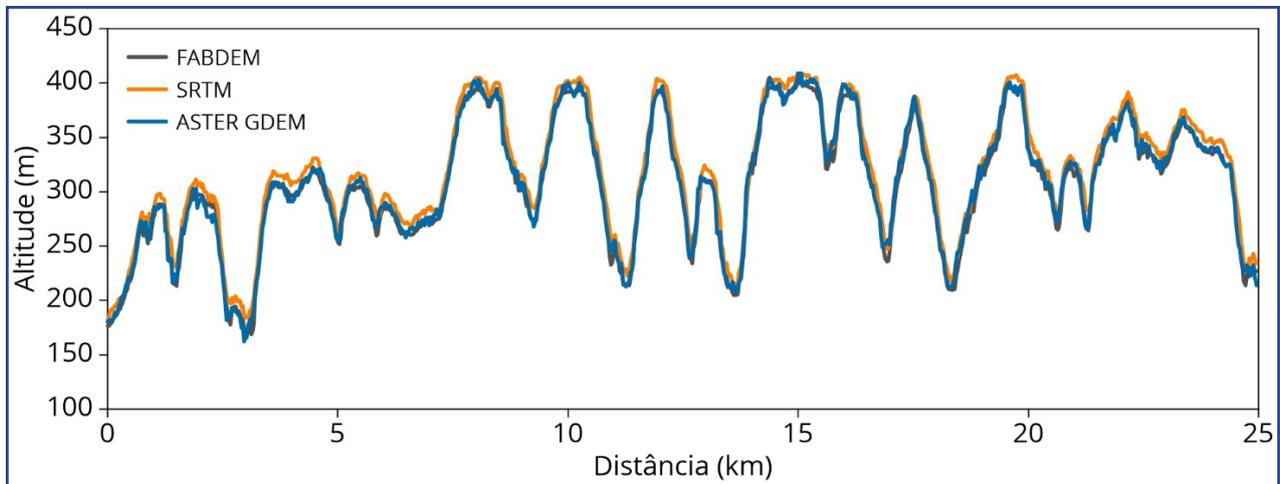


Fonte: Autores (2023)

Embora ambos os modelos possibilitem a identificação das formas de relevo encontradas na área do parque, tanto o ASTER GDEM, quanto o SRTM apresentaram valores discrepantes de altimetria em relação à encontrada no FABDEM, o que mostra que a fonte de dados utilizada interfere diretamente na identificação do gradiente vertical. Embora na literatura seja comprovado que o SRTM apresenta um erro vertical menor quando comparado ao ASTER GDEM, os resultados apontam o esse modelo pode apresentar variações superior a dez metros, neste estudo de caso.

O perfil altimétrico longitudinal, apresentado na Figura 3 (com traçado apresentado na Figura 2a), obtido a partir dos valores altimétricos encontrados nos modelos digitais de elevação analisados, permitiu identificar onde ocorrem as principais diferenças entre os modelos digitais de elevação analisados. Considerando que o seu relevo é caracterizado pela presença de vales fluviais entalhados, que mostra uma grande influência na rede de drenagem na sua formação (Gaida *et al.*, 2016), o Parque Estadual do Turvo apresenta uma modelagem topográfica complexa, marcada por grandes variações altimétricas em seu interior.

Figura 3 – Perfil topográfico longitudinal da área do Parque Estadual do Turvo, com altitudes de acordo com os modelos digitais de elevação ASTER GDEM v3, SRTM v3 e FABDEM

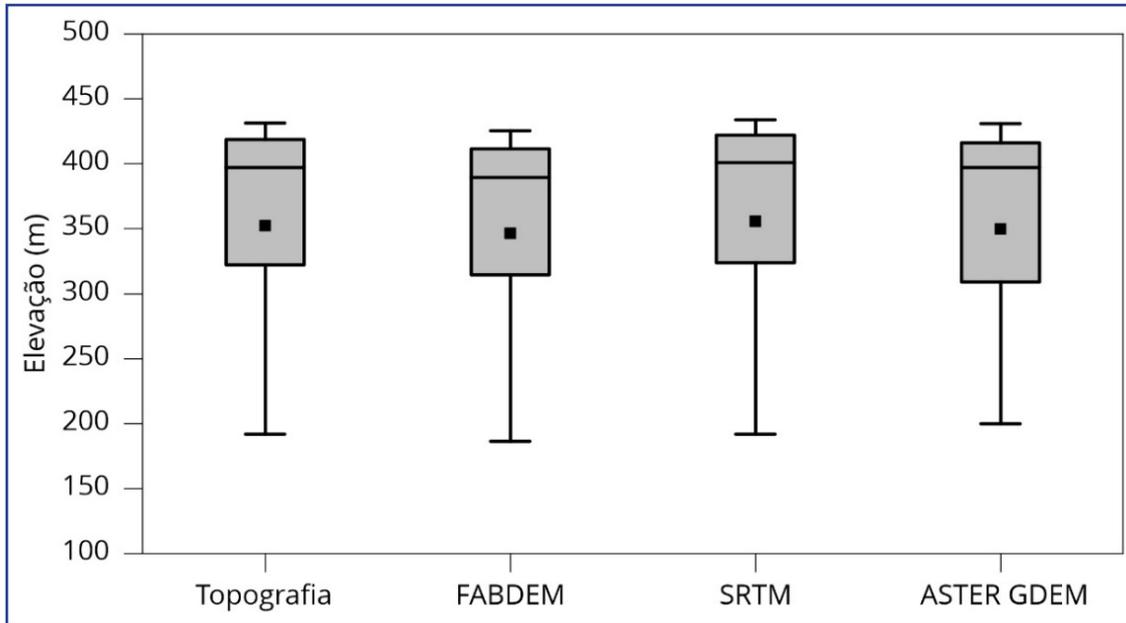


Fonte: Autores (2023)

A análise do perfil topográfico permitiu identificar que ambos os modelos apresentam grande similaridade na representação das variações do gradiente altimétrico. Comparando-se os modelos analisados, em média, foram registradas discrepâncias altimétricas de 10,52 metros ao comparar os modelos topográficos SRTM e FABDEM. Em contraste, a diferença média cai para apenas 1,88 metros, quando comparada com o modelo ASTER GDEM. No entanto, ao analisar os perfis topográficos associados a cada um desses modelos, identificou-se que, particularmente em regiões com menor declividade, como nas áreas de topos de morros, os valores altimétricos obtidos com o modelo ASTER GDEM apresentam limitações na representação precisa das feições de relevo existentes. Esse comportamento é descrito por Moges *et al.* (2023), no qual os autores observaram desvios altimétricos mais substanciais, influenciados pela cobertura florestal, em áreas de maior declividade.

A partir dos locais onde foram realizadas a aquisição das medidas de altitude por meio do levantamento topográfico, foram adquiridas as medidas correspondentes estimadas nos modelos digitais de elevação analisados. A variação dos valores é apresentada no gráfico da Figura 3.

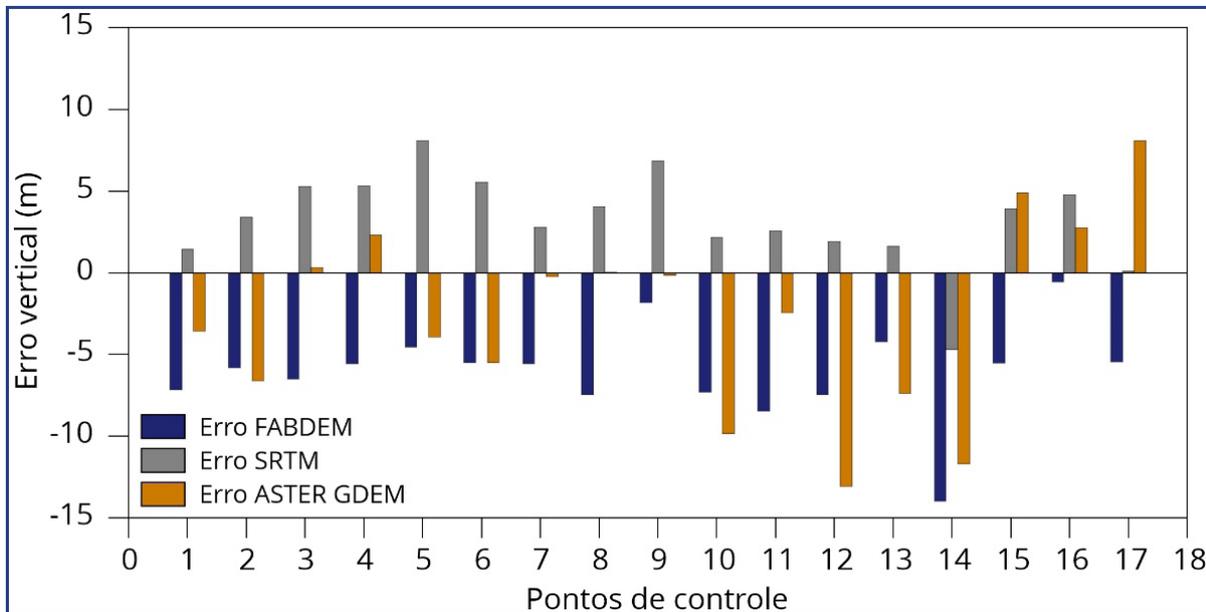
Figura 3 – Amplitude das medidas de elevação obtidas por meio de levantamento topográfico em campo e dos modelos digitais de elevação FABDEM, SRTM e ASTER GDEM



Fonte: Autores (2023)

Analisando-se de forma preliminar, não foram encontradas diferenças significativas entre as medidas de elevação, com os modelos apresentando variação semelhante a encontrada nos dados do levantamento topográfico. Analisando-se os erros entre as medidas de altitude obtidas por meio de levantamento topográfico e as estimadas pelos modelos digitais de elevação analisados, verificou-se que as medidas estimadas pelo FABDEM, apresentam-se em grande parte, inferiores aos de referência, como mostrado no gráfico da Figura 4, sendo encontrado um erro médio de -6,05 metros, enquanto que os valores estimados pelo modelo SRTM apresentaram um erro médio de 3,2284 metros, e do ASTER GDEM, -2,7128 metros. Isto indica que o FABDEM apresenta valores em sua maioria, subestimados em relação as medidas de referência. Este comportamento pode ser visto nos dados obtidos pelo ASTER GDEM, enquanto que o SRTM apresenta valores levemente superestimados em relação aos obtidos no levantamento topográfico.

Figura 4 – Erros verticais encontrados nos pontos onde foi realizado o levantamento topográfico em 17 pontos



Fonte: Autores (2023)

Por outro lado, analisando-se o erro médio quadrático foi verificado que o SRTM apresentou uma maior precisão global em relação aos demais modelos, com um RMSE de 4,2903, enquanto que o FABDEM apresentou a menor, com valor de 6,6606, seguido pelo ASTER GDEM, apresentando uma precisão pouco maior que o FABDEM, com valor de 6,2767. Estes valores podem estar relacionados ao fato de que os modelos FABDEM e ASTER GDEM, apresentem subestimação dos valores altimétricos, apresentando valores menores que os de referência.

De acordo com a análise de comparação, realizada por meio do teste de Kruskal-Wallis, não foram encontradas diferenças estatisticamente significativas entre as medidas de elevação analisadas ( $p$  valor > 0,05), como mostrado na Tabela 1. Isto pode estar relacionado as pequenas diferenças encontradas entre os dados extraídos dos modelos digitais de elevação e as medidas de elevação obtidas por meio de topografia em campo.

Tabela 1 – Resultado do teste de Kruskal-Wallis entre as medidas de elevação obtidas a partir de topografia e dos modelos digitais de elevação analisados

	<b>X<sup>2</sup></b>	<b>gl</b>	<b>p</b>
Elevação (m)	1,817	3	0,6112

Fonte: Autores (2023)

A análise dos resultados do teste de comparação múltipla entre as medidas de elevação analisadas, mostrou que não existem diferenças estatisticamente significativas entre estas, conforme exposto na Tabela 2. No entanto, os valores de p indicam uma maior relação entre as medidas de topografia e do FABDEM com as extraídas do modelo ASTER GDEM, o que corrobora com o encontrado na análise gráfica, destacando que as medidas de elevação do SRTM mostram-se com maiores diferenças em relação as demais. A menor correspondência, embora não significativa, foi encontrada entre os modelos FABDEM e SRTM.

Tabela 2 – Resultado do teste de comparações múltiplas de Dwass-Steel-Critchlow-Fligner, para as medidas de elevação obtidas por meio de topografia e a partir dos modelos digitais de elevação avaliados

	<b>W</b>	<b>p</b>
Topografia - FABDEM	-1,1934	0,8338
Topografia - SRTM	0,9986	0,8970
Topografia - ASTER GDEM	-0,755	0,9509
FABDEM - SRTM	1,4858	0,7197
FABDEM - ASTER GDEM	0,7063	0,9593
SRTM - ASTER GDEM	-1,3154	0,7890

Fonte: Autores (2023)

Destaca-se que embora sejam evidentes as diferenças entre as análises gráfica (somente entre os modelos) e estatísticas (entre as elevações obtidas por meio de topografia de campo e dos modelos), as diferenças encontradas ocorrem em locais específicos, associadas as formas de relevo mais pronunciadas como vales profundos e vertentes com elevada declividade, de difícil acesso para a rea-

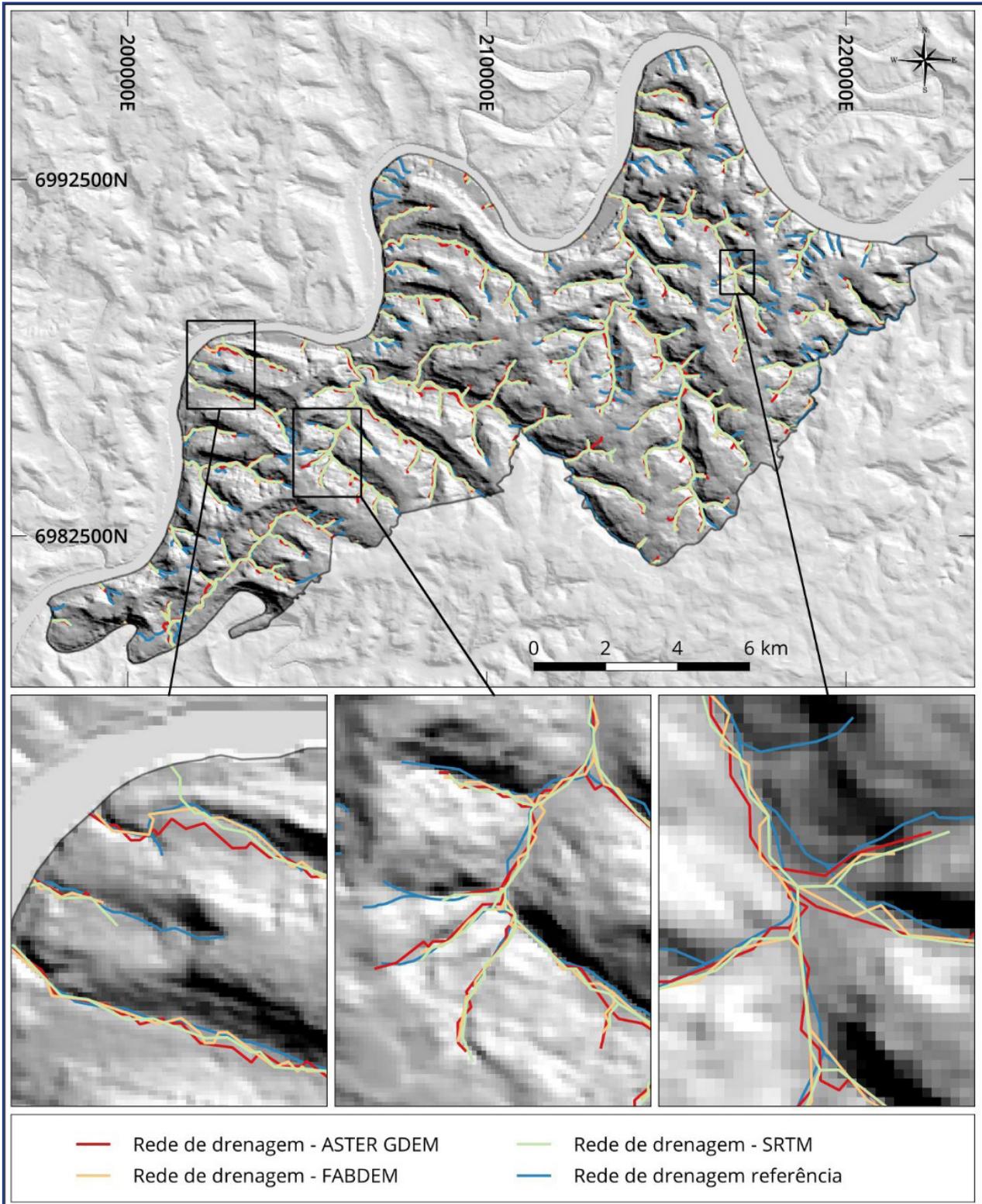
lização de levantamentos topográficos. Desta forma, para as áreas fora destas condições, como áreas mais planas e topos de morros, as diferenças entre os modelos são irrelevantes, não sendo possível priorizar o uso de determinado modelo para a modelagem topográfica. No entanto, destaca-se a necessidade de estudos mais aprofundados nas áreas associadas aos grandes vales fluviais que cortam a área do parque, principalmente com uma maior amostragem de dados a campo ou mesmo, comparação com modelos gerados com dados de VANTs.

## **4.2 Análise da rede de drenagem**

A análise de similaridade entre as redes de drenagem mostrou que o modelo FABDEM apresentou uma maior correspondência em relação a referência, apresentando uma sobreposição de 45,72% entre os canais de drenagem, seguido pela drenagem extraída do modelo SRTM, com sobreposição de 41,74%. A drenagem extraída do modelo ASTER GDEM foi a que apresentou a menor correspondência espacial, sobrepondo-se apenas em 38,39% da área do parque.

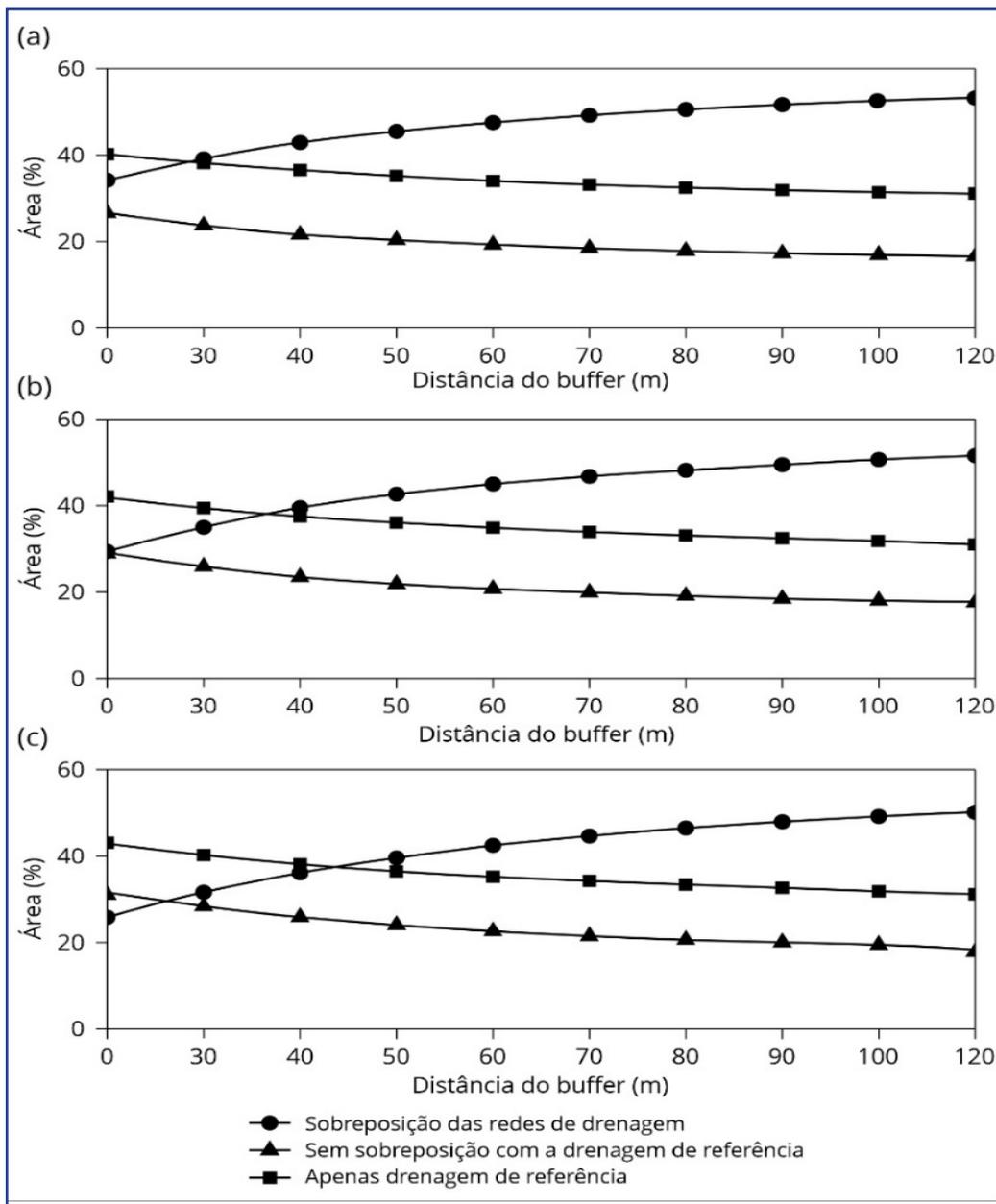
De maneira geral, as redes de drenagem obtidas a partir dos modelos digitais de elevação apresentaram uma similaridade na representação das formas e extensões dos canais principais. No entanto, existem divergências significativas quanto a espacialização dos canais, não havendo na maior parte da área do parque coincidência espacial entre os canais. Este comportamento ocorre principalmente nos setores em que há inserção de canais afluentes, sendo em muitas vezes a forma do setor não representativa da realidade, como apresentado no mapa da Figura 5.

Figura 5 – Espacialização das redes de drenagem obtidas por meio dos modelos digitais de elevação analisados em relação a rede de drenagem de referência existente na área do parque



Fonte: Autores (2023)

Figura 6 – Análise de sobreposição a partir de buffers entre as redes de drenagem extraídas a partir dos modelos digitais de elevação (a) FABDEM, (b) SRTM e (c) ASTER GDEM, em relação à referência



Fonte: Autores (2023)

No que diz respeito a representatividade espacial das redes de drenagem obtidas, a análise de proximidade entre as redes de drenagem obtidas a partir dos modelos e a de referência, mostrou que a maior parte dos canais estimados, apresenta uma distância significativa de até 120 metros em relação a localização real do curso de água.

Apenas a rede de drenagem extraída do modelo FABDEM apresentou sobreposição direta com a rede de drenagem de referência considerando a área de um pixel, sendo isto verificado em 40% da área abrangida pela rede de drenagem, como mostrado na Figura 6a. Novamente, cabe destacar as limitações associadas aos dados de referência utilizados no estudo (Souza, Sampaio, 2015).

As demais redes de drenagem obtidas com os modelos SRTM e ASTER GDEM apresentaram um comportamento diferente de sobreposição, sendo a área abrangida menor do que a área com apenas a drenagem de referência, considerando um intervalo de 30 metros, igual a resolução espacial dos modelos analisados. No caso da drenagem obtida pelo modelo ASTER GDEM, a discrepância é maior considerando uma distância de 30 metros, sendo na maior parte da área da drenagem, não encontrada sobreposição de canais. Sendo encontradas distâncias mínimas de até 50 metros entre os canais, como mostrado na Figura 6c.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo mostram que embora cada uma dos modelos digitais de elevação analisados apresentem diferenças na estimativa da altimetria da área do Parque Estadual do Turvo, estas não são estatisticamente significativas a ponto de que seja definido um dos modelos para melhor representação da topografia do parque. No entanto, as análises apontam que o modelo FABDEM apresenta uma razoável vantagem em relação aos demais, uma vez que não foram encontradas superestimativas de valores altimétricos em relação aos obtidos por meio de levantamento topográfico. Desta forma, é possível concluir a partir dos resultados que este modelo apresenta uma menor influência do dossel florestal, o que pode ser observado nas medidas altimétricas superestimadas do modelo SRTM e com grande oscilação de variação como as do modelo ASTER GDEM.

A análise da capacidade dos modelos em delinear a rede de drenagem na área do parque, mostrou que o FABDEM apresenta uma maior similaridade espacial e maior sobreposição de canais em relação à referência adotada, principalmente nos

setores com chegada de canais afluentes. As drenagens obtidas, de maneira geral, representaram os canais principais da drenagem existente no parque, embora sejam encontrados deslocamentos na representação dos canais, o que pode ser atribuído a influência da vegetação e a resolução espacial dos modelos.

Destaca-se a necessidade de realização de novos estudos sobre a eficiência dos modelos digitais de elevação na estimativa da altimetria na área do Parque Estadual do Turvo, uma vez que áreas com elevada declividade não foram abordadas neste trabalho, devido às limitações impostas pela floresta para a realização de levantamentos topográficos in situ na área, uma vez que as maiores diferenças entre os modelos foram encontradas nas áreas dos extensos vales fluviais que cortam a área do parque.

## AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) (processos nº 305914/2014-6; 408105/2018-6 e; 305084/2020-8), Fundação de Amparo da Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) (EDITAL 04/2016 - Programa de nucleação de grupos de pesquisa) e a Fundação de Amparo da Pesquisa do Estado do São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro. A CAPES (programa de solidariedade acadêmica PVE) pelo auxílio via bolsa de pós-doutorado. A UFSM pelo apoio para a execução do trabalho de campo e coleta de dados. Aos colaboradores que auxiliaram na coleta dos dados de campo.

## REFERÊNCIAS

ABDEL-MAGUID, R. H. Evaluation of vertical accuracy of different digital elevation models sources for Buraydah city. **Applied Geomatics**, v. 13, pp. 919-924, 2021.

ABRAMS, M.; BAILEY, B.; TSU, H.; HATO, M. The ASTER Global DEM. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 76, pp. 344-348, 2010.

ABRAMS, M.; CRIPPEN, R.; FUJISADA, H. ASTER global digital elevation model (GDEM) and ASTER global water body dataset (ASTWBD). **Remote Sensing**, v. 12, n. 7, 2020.

ANDERSEN, K. M.; TURNER, B. L.; DALLING, J. W. Seedling performance trade-offs influencing habitat filtering along a soil nutrient gradient in a tropical forest. **Ecology**, v. 95, n. 2, pp. 3399-

3413, 2014.

ATTEMA, E.; CAFFORIO, C.; GOTTWALD, M.; GUCCIONE, P.; GUARNIERI, A. M.; ROCCA, F.; SNOEIJ, P. Flexible dynamic block adaptative quantization for Sentinel-1 SAR missions. **IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters**, v. 7, n. 4, pp. 766-770, 2010.

BULFE, N. M. L. **Dinâmica de clareiras originadas de exploração seletiva de uma floresta estacional semidecidual na Provincia de Misiones, nordeste da Argentina**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná (UFPR) – Curitiba, 73 p., 2008.

CHADWICK, K. D.; ASNER, G. P. Tropical soil nutrient distributions determined by biotic and hillslope processes. **Biogeochemistry**, v. 127, pp. 273-289, 2016.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E.; CRIPPEN, R.; DUREN, R.; HENSLEY, S.; KOBRICK, M.; PALLER, M.; RODRIGUEZ, E.; ROTH, L.; SEAL, D.; SHAFFER, S.; SHIMADA, J.; UMLAND, J.; WERNER, M.; OSKIN, M.; BURBANK, D.; ALSDORF, D. The Shuttle Radar Topography Mission. **Reviews of Geophysics**, v. 45, n. 2, pp. 1-33, RG2004, 2007.

GAIDA, W.; BREUNIG, F. M.; GALVÃO, L. S.; TELES, T. S.; BALBINOT, R. Variações da reflectância e dos índices de vegetação em função dos parâmetros da modelagem topográfica no Parque Estadual do Turvo, Rio Grande do Sul, Brasil. **Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía**, v. 2016, n. 91, pp. 105-123, 2016.

GROHMANN, C. H. Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected brazilian sites: comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30. **Remote Sensing**, v. 212, pp. 121-133, 2018.

GUADAGNIN, D. L. **Zonificación del Parque Estadual do Turvo, RS, Brasil, y directivas para el plan de manejo**. Tese de Doutorado. Universidad Nacional de Córdoba – Córdoba, Argentina. 1994.

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, 2022.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Folhas SH 22 Porto Alegre e parte das folhas SH 21 e SI 22 Lagoa Mirim**: levantamento de recursos naturais. Geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro; 1986. v. 33.

JUCKER, T.; BONGALOV, B.; BURSLEM, D. F. R. P.; NILUS, R.; DALPONTE, M.; LEWIS, S. L.; PHILLIPS, O. L.; QIE, L.; COOMES, D. A. Topography shapes the structure, composition and function of tropical forest landscapes. **Ecology Letters**, v. 21, n. 7, p. 989-1000, 2018.

HUNG, M. N. W. B., SAMPAIO, T. V. M., SCHULTZ, G. B., SIEFERT, C. A. C., LANGE, D. R., MARANGON, F. H. S., & SANTOS, I. DOS. (2018). Levantamento Com Veículo Aéreo Não Tripulado Para Geração De Modelo Digital Do Terreno Em Bacia Experimental Com Vegetação Florestal Esparsa. **Raega**, v. 43, n. 215. 2018.

LI, Y.; LI, L.; CHEN, C.; LIU, Y. Correction of global digital elevation models in forested areas using an artificial neural network-based method with the consideration of spatial autocorrelation. **International Journal of Digital Earth**, v. 16, n. 1, pp. 1568-1588, 2023.

LIANG, Y.; QU, Y.; GUO, D.; CUI, T. Vertical accuracy evaluation of ASTER GDEM2 over a mountainous area based on UAV photogrammetry. In: ISPRS TC II Mid-term Symposium, Riva del Garda, 2018. **Proceedings...** International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, v. XLII-2, pp. 579-584, 2018.

MOGES, D. M.; VIRRO, H.; KMOCH, A.; CIBIN, R.; ROHITH, A. N.; MARTÍNEZ-SALVADOR, A.; CONESA-GARCÍA, C.; UUEMAA, E. How does the choice of DEMs affect catchment hydrological modeling? **Science of the Total Environment**, v. 892, 2023.

MUÑOZ, V. A.; VALERIANO, M. M.; BISPO, P. C. Surveying the topographic height from SRTM data for canopy mapping in the Brazilian Pantanal. **Geografia**, v. 38, n. especial, pp. 139-155, 2013.

MUSCARELLA, R.; KOLYAI, S.; MORTON, D. C.; ZIMMERMAN, J. K.; URIARTE, M. Effects of topography on tropical forest structure depend on climate context. **Journal of Ecology**, v. 108, n. 1, pp. 145-159, 2020.

NEUMAN, Gisele; SILVEIRA, Claudinei Taborda Da; SAMPAIO, Tony Vinicius Moreira. Análise Da Influência Da Escala Na Obtenção Dos Atributos Topográficos Derivados De Mde. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, [s. l.], v. 43, p. 179, 2018.

NI, W.; SUN, G.; RANSON, K. J. Characterization of ASTER GDEM elevation data over vegetated area compared with lidar data. **International Journal of Digital Earth**, v. 8, n. 3, pp. 198-211, 2015.

O'LOUGHLIN, F. E.; PAIVA, R. C. D.; DURAND, M.; ALSDORF, D. E.; BATES, P. D. A multi-sensor approach towards a global vegetation corrected SRTM DEM product. **Remote Sensing of Environment**, v. 182, pp. 49-59, 2016.

PREETY, K.; PRASAD, A. K.; VARNA, A. K.; EL-ASKARY, H. Accuracy assessment, comparative performance, and enhancement of public domain digital elevation models (ASTER 30 m, SRTM 30 m, CARTOSAT 30 m, SRTM 90 m, MERIT 90 m, and TanDEM-X 90 m) using DGPS. **Remote Sensing**, v. 14, 1334, 2022.

RIO GRANDE DO SUL. Decreto nº 17.432, de 11 de agosto de 1965. Retifica os limites da Reserva Florestal Estadual, situada no Município de Tenente Portela. Constituição do Estado do Rio Grande do Sul: Porto Alegre, 1965.

SAHOO, R.; JAIN, V. Sensitivity of drainage morphometry based hydrological response (GIUH) of a river basin to the spatial resolution of DEM data. **Computers & Geosciences**, v. 111, pp. 78-86, 2018.

SAMPAIO, T. V. M.; ROCHA, J. On the quality of the drainage network cartographic representation. **Ecological Indicators**, [s. l.], v. 143, 2022.

SATGÉ, F.; BONNET, M. P.; TIMOUK, F.; CALMANT, S.; PILLCO, R.; MOLINA, J.; LAVADO-CASIMIRO, W.; ARSEN, A.; CRÉTAUX, J. F.; GARNIER, J. Accuracy assessment of SRTM v4 and ASTER GDEM v2 over the Altiplano watershed using ICESat/GLAS data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 36, n. 2, pp. 465-488, 2015.

SCHLUND, M.; BARON, D.; MAGDON, P.; ERASMI, S. Canopy penetration depth estimation with TanDEM-X and its compensation in temperate forests. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 147, p. 232-241, 2019.

SECRETARIA ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO SUL (SEMA/RS). **Plano de Manejo do Parque Estadual do Turvo - RS**. Porto Alegre: SEMA, 2005. Disponível em: <<https://www.sema.rs.gov.br/upload/arquivos/201610/24172430-plano-manejo-peturvo.pdf>>. Acesso em: 16 out. 2021.

SHERMAN, G. **QGIS - A Free and Open Source Geographic Information System**. Viena GNU - Free Software Foundation, Inc., 2002. Disponível em: <http://www.qgis.org/en/site/>. Acesso em: fev. 2024.

SOUZA, G. M.; MATRICARDI, E. A. T. Análise comparativa dos modelos de elevação SRTM, ASTER GDEM e TOPODATA para estimar o fator topográfico (LS) da USLE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. pp. 4435-4442.

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.

SU, Y.; GUO, Q.; MA, Q.; LI, W. SRTM DEM correction in vegetated mountain areas through the integration of spaceborne LiDAR, airborne LiDAR, and optical imagery. **Remote Sensing**, v. 7, pp. 11202-11225, 2015.

TVEITE, H.; LANGAAS, S. An accuracy assessment method for geographical line data sets based on buffering. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 13, n. 1, p. 27-47, 1999.

WERNER, F. A.; HOMEIER, J. Is tropical montane forest heterogeneity promoted by a resource-driven feedback cycle? Evidence from nutrient relations, herbivory and litter decomposition along a topographical gradient. **Functional Ecology**, v. 29, n. 3, p. 430-440, 2015.

WOODROW, K.; LINDSAY, J. B.; BERG, A. A. Evaluating DEM conditioning techniques, elevation source data, and grid resolution for field-scale hydrological parameter extraction. **Journal of Hydrology**, v. 540, pp. 1022-1029, 2016.

XIA, S. -W.; CHEN, J.; SCHAEFER, D.; GOODALE, U. M. Effect of topography and litterfall input on fine-scale patch consistency of soil chemical properties in a tropical rainforest. **Plant and Soil**, v. 404, pp. 385-398, 2016.

## Contribuições de autoria

### 1 – William Gaida

Universidade Federal de Santa Maria, Doutor em Geografia  
<https://orcid.org/0000-0001-9946-0493> • [ufsm.william@gmail.com](mailto:ufsm.william@gmail.com)  
Contribuição: Conceituação, investigação, escrita - primeira redação

## 2 – Daniele Arendt Erthal

Universidade Federal de Santa Maria, Doutora em Geografia  
<https://orcid.org/0000-0003-1424-6522> • [dani.a.erthal@hotmail.com](mailto:dani.a.erthal@hotmail.com)  
Contribuição: Conceituação, investigação, escrita - primeira redação

## 3 – Fábio Marcelo Breunig

Universidade Federal de Santa Maria, Doutor em Sensoriamento Remoto  
<https://orcid.org/0000-0002-0405-9603> • [fabio-breunig@gmail.com](mailto:fabio-breunig@gmail.com)  
Contribuição: Conceituação, investigação, escrita - primeira redação

## 4 – Tony Vinicius Moreira Sampaio

Universidade Federal de Santa Maria, Doutor em Geografia  
<https://orcid.org/0000-0002-8286-5766> • [tony2sampaio@gmail.com](mailto:tony2sampaio@gmail.com)  
Contribuição: Conceituação, investigação, escrita - primeira redação

## 5 – Renato Beppler Spohr

Universidade Federal de Santa Maria, Doutor em Engenharia Agrícola  
<https://orcid.org/0000-0003-3941-4799> • [renato.spohr@ufsm.br](mailto:renato.spohr@ufsm.br)  
Contribuição: Conceituação, investigação, escrita - primeira redação

## Como citar este artigo

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**, Santa Maria, v. 28, e85914, 2024. Disponível em: [10.5902/2236499485914](https://doi.org/10.5902/2236499485914). Acesso em: dia mês abreviado. ano.