

Comparação e Avaliação de Modelos Digitais de Elevação dos sensores SRTM, ASTER, TANDEM/TERRASAR –X, NASADEM, COPERNICUS DEM e ALOS PALSAR para análise digital de terreno para aplicações no saneamento básico

Comparison and Evaluation of Digital Elevation Models of SRTM, ASTER, TANDEM/TERRASAR –X, NASADEM, COPERNICUS DEM and ALOS PALSAR sensors for digital land analysis for applications in basic sanitation

Comparación y Evaluación de Modelos Digitales de Elevación de sensores SRTM, ASTER, TANDEM/TERRASAR –X, NASADEM, COPERNICUS DEM y ALOS PALSAR para análisis digital de terrenos para aplicaciones en saneamiento básico

Recebido: 14/12/2022 | Revisado: 29/12/2022 | Aceitado: 03/01/2023 | Publicado: 05/01/2023

Fernando Yogi

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5487-4246>
Universidade Federal de São Carlos, Brasil
E-mail: fyogi@hotmail.com

Fábio Noel Stanganini

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2497-2395>
Universidade Federal de São Carlos, Brasil
E-mail: fnsgeo@gmail.com

Resumo

Modelos Digitais de Elevação (MDEs) são modelos matemáticos que reproduzem uma superfície topográfica a partir de coordenadas cartesianas “x e y”, com atributos altimétricos “z”, sendo que “z” representa a variação de uma superfície. Os MDEs apresentam várias aplicações, podem ser utilizados na gestão de recursos hídricos e ambientais. Neste âmbito, o objetivo deste trabalho foi comparar diferentes sistemas sensores, SRTM (1, 2 e 3), COPERNICUS DEM, TopoData, ASTER GLOBAL DEM 2 e o ALOS PALSAR, por intermédio de um sistema binômio formado pelas variáveis altimétricas, verificando a dispersão e precisão através dos dados de MDE, também pela análise física do perfil altimétrico decorrente do talvegue de maior extensão no município de São Carlos. A análise consistiu também na avaliação estatística dos MDE com Teste T de Student e Análise de Variância (ANOVA). Seguindo com os Mapas de Orientação de Vertente verificando quais foram as vertentes predominantes, pelos Perfis Altimétricos dos MDEs demonstrando pequenas diferenças de cota e conforme o par analisado, diferenças posicionais. A melhor correlação ocorreu entre os sensores SRTM, enquanto a pior foi dada pelos sensores da família TANDEM/TERRASAR-X. Quanto às comparações físicas (visuais) e estatísticas dos dados de MDE, afirma-se a pertinência quanto à similaridade dos sensores SRTM 30, TopoData e NASADEM, a maior diferença entre ASTER GDEM e TANDEM/TERRASAR-X. Diferença ocorre devido ao processo de constituição do MDE, principalmente pela resolução espacial de cada.

Palavras-chave: Modelo digital de elevação; Modelo digital do terreno; Sensoriamento remoto; Geoprocessamento.

Abstract

Digital Elevation Models (DEMs) are mathematical models that reproduce a topographic surface from Cartesian coordinates “x and y”, with altimetric attributes “z”, where “z” represents the variation of a surface. The MDEs have several applications, they can be used in the management of water and environmental resources. In this context, the objective of this work was to compare different sensor systems, SRTM (1, 2 and 3), COPERNICUS DEM, TopoData, ASTER GLOBAL DEM 2 and ALOS PALSAR, through a binomial system formed by the altimetric variables, verifying the dispersion and precision through the MDE data, also through the physical analysis of the altimetric profile resulting from the longest thalweg in the municipality of São Carlos. The analysis also consisted of the statistical evaluation of the MDE with Student's T Test and Analysis of Variance (ANOVA). Continuing with the Slope Orientation Maps, verifying which were the predominant slopes, by the Altimetric Profiles of the MDEs showing small differences in elevation and, according to the analyzed pair, positional differences. The best correlation occurred between the SRTM sensors, while the worst was given by the TANDEM/TERRASAR-X family sensors. As for the physical (visual) and statistical comparisons of the MDE data, the pertinence is affirmed regarding the

similarity of the SRTM 30, TopoData and NASADEM sensors, the greatest difference between ASTER GDEM and TANDEM/TERRASAR-X. The difference is due to the MDE constitution process, mainly due to the spatial resolution of each.

Keywords: Digital elevation model; Digital terrain model; Remote sensing; Geoprocessing.

Resumen

Los Modelos Digitales de Elevación (DEM) son modelos matemáticos que reproducen una superficie topográfica a partir de coordenadas cartesianas “x e y”, con atributos altimétricos “z”, donde “z” representa la variación de una superficie. Los MDE tienen varias aplicaciones, se pueden utilizar en la gestión de los recursos hídricos y ambientales. En este contexto, el objetivo de este trabajo fue comparar diferentes sistemas de sensores, SRTM (1, 2 y 3), COPERNICUS DEM, TopoData, ASTER GLOBAL DEM 2 y ALOS PALSAR, a través de un sistema binomial formado por las variables altimétricas, verificando la dispersión y precisión a través de los datos MDE, también a través del análisis físico del perfil altimétrico resultante de la vaguada más larga del municipio de São Carlos. El análisis también consistió en la evaluación estadística del MDE con la Prueba T de Student y Análisis de Varianza (ANOVA). Continuando con los Mapas de Orientación de Taludes, verificando cuales eran los taludes predominantes, mediante los Perfiles Altimétricos de los MDE mostrando pequeñas diferencias de cota y, según el par analizado, diferencias posicionales. La mejor correlación se presentó entre los sensores SRTM, mientras que la peor la dieron los sensores de la familia TANDEM/TERRASAR-X. En cuanto a las comparaciones físicas (visuales) y estadísticas de los datos MDE, se afirma la pertinencia en cuanto a la similitud de los sensores SRTM 30, TopoData y NASADEM, la mayor diferencia entre ASTER GDEM y TANDEM/TERRASAR-X. La diferencia se debe al proceso de constitución de MDE, principalmente por la resolución espacial de cada uno.

Palabras clave: Modelo de elevación digital; Modelo de terreno digital; Teledetección; Geoprocementamiento.

1. Introdução

Modelo Digital de Elevação (MDE) é uma representação matemática de elementos presentes na superfície terrestre, caracterizadas por um plano cartesiano (x, y) de uma região de uma superfície, com o diferencial de possuírem uma terceira informação, a altitude (z). Para Iorio et al. (2012) Faithy et al. (2019), Littidej e Buasri (2019) e Ye et al. (2019) dados de relevo e levantamentos de redes hídricas são produtos cartográficos obtidos destes modelos e estão bem difundidos entre os estudos hídricos.

Yogi (2018) afirma que as aplicações com enfoque no desenvolvimento estratégico, na etapa de planejamento é necessário a compreensão das diferentes dinâmicas ecológicas em múltiplas escalas (dimensões espaciais), no nível precisão que os estudos envolvidos necessitam.

Assim, torna-se constante o desafio para a apropriação correta dos investimentos em infraestrutura, destaque pode ser dado em situações contrastantes, em que o meio urbano adentra o meio o rural. Nas regiões que estão em constante urbanização, Egg, et al., (2019) indicam que tais cenários carecem de infraestrutura e tornam-se o centro de atenções para iniciativas, na busca de melhores soluções, no encaicho de dados confiáveis para modelar o terreno, mapeando-as em escala adequada.

Uma das etapas realizadas para a modelagem do terreno pode ser realizada por Sensoriamento Remoto integradas com um Sistema de Informação Geográfica (SIG), sinergia que deve ser capaz de mapear e classificar subprodutos de um MDE para planejamento e gestão dos espaços urbanos. Destacam-se nesse processo, são as imagens SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), o ASTER GLOBAL DEM2, o COPERNICUS, o ALOS PALSAR, o TopoData e o BARE-EARTH.

A qualidade de um MDE depende de sua acurácia e tipo e da grandeza dos erros à que foram atribuídos. É importante considerar que os erros são inevitáveis, visto que os MDEs são representações matemáticas da superfície terrestre. Os parâmetros modelados são, portanto, subjetivos, embora sua representação possa ser obtida com maior ou menor acurácia. Acurácia que depende da fonte de dados, de resolução espacial e escala de trabalho, há uma preocupação com o uso indiscriminado dos dados oriundos do MDE, são usados frequentemente sem qualquer referência à grandeza destes erros ou à técnica aplicada para sua validação (Chagas et al., 2010).

Desta forma, para que um MDE possa ser utilizado na produção cartográfica e análise ambiental, deve-se, primeiro,

conhecer sua confiabilidade locacional dos dados representados, tanto em um plano cartesiano quanto para planos que estão atribuídas as dimensões de altura ou profundidade. Conforme o Decreto de Brasil (1984), a validação da acurácia altimétrica dos MDEs tem sido realizada pela aplicação do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), normatizado no Decreto 89.817 de 1984.

Pompermayer (2013) esclarece que a formação do relevo é crucial para determinação de parâmetros de uma bacia hidrográfica, a partir MDE é possível obter elementos topográficos como altitude, declividade, comprimento do talvegue, e, por intermédio de algoritmos mapas de fluxo é capaz de indicar a direção de escoamento de uma área de drenagem para uma rede hidrológica.

Oliveira e Paradella (2008) ressalta que a identificação dos interflúvios e do contorno da bacia hidrográficas através de dados oriundos dos MDEs são vantajosos, uma vez que pode se definir forma automatizada das áreas de drenagem da bacia, permitindo um traçado padronizado.

A partir dos MDEs e seus subprodutos podem ser realizados estudos ambientais: regiões sujeitas à erosão, delimitação de rede hidrográfica e bacia hidrográfica, mapeamento de áreas de preservação permanente e subsídio ao projeto executivo de rodovias e drenagens, adequações a possíveis extravasamentos de bacias de esgotamentos sanitários em áreas de fundo de vale, instalação de reservatórios para distribuição de água conforme as zonas de abastecimento (Zona baixa, média ou alta) adequações do sistema viário e construção de obras de arte (barragens, túneis etc.) (Abrahão, 2020).

Considerando que as obras de Saneamento possuem em média um horizonte de projeto de 20 a 30 anos é de vital importância a manutenção das informações destes sistemas. E um dos principais problemas que permeiam o setor de saneamento básico é a ausência de cadastro técnico atualizado de base de dados de clientes das redes de abastecimento de água e de esgoto sanitário. Os SIGs permitem estruturar tais informações, possibilitam uma análise integrada para o planejamento das ações, facilitando atualizações de dados. Além da integração dos SIGs com os softwares de modelagem hidráulica, compilam dados essenciais à simulação e dimensionamento dos componentes, principalmente conforme a aderência às vertentes do saneamento básico. (Ribeiro & Paramanhos Filho, 2021)

Segundo Mendonça Junior e Issmael (2020), medições de qualquer natureza estão sujeitas aos mais diferentes tipos de erros, sejam eles caracterizados como grosseiros, sistemáticos ou aleatórios, assim, os dados altimétricos provenientes de um MDE podem acumular erros fora do intervalo admitido do Desvio Padrão, e os erros mais grosseiros, *outliers*, são primeiramente detectados, enquanto os sistemáticos, produzidos por causas conhecidas, podem ser evitados por técnicas especiais de observação, por modelação devendo ser tratados estatisticamente.

A distribuição T de Student é utilizada quando o desvio padrão é desconhecido e quando a população original tem distribuição essencialmente normal, as amostras que apresentam variáveis independentes podem ser verificadas como as mais significativas a partir de testes T de Student.

A Análise de Variância (ANOVA) é uma técnica estatística que permite avaliar o erro de medição e fontes variáveis de dados pertinentes a um sistema de medição. A análise de variância de um único fator é um incremento do teste T de Student, (*One-Way ANOVA*), segundo Oliveira (2010), permite verificar “qual o efeito de uma variável independente de natureza qualitativa, também chamada de fator, numa variável dependente ou resposta, de natureza quantitativa” O ANOVA consiste em agrupar as observações da variável dependente em cada um dos fatores analisados, comparando as médias amostrais. A existência de pelo menos um grupo com média diferente leva a rejeição da hipótese, ultrapassa o nível de significância indicando que está dentro da probabilidade de rejeitar a hipótese inicial.

O Erro Quadrático Médio (EQM) também pode ser usado como uma medida do erro de previsão. O EQM é determinado somando os erros de previsão ao quadrado e dividindo pelo número de erros das amostras.

Com a evolução da tecnologia aeroespacial para obtenção de dados para o Sensoriamento Remoto, leva-se a

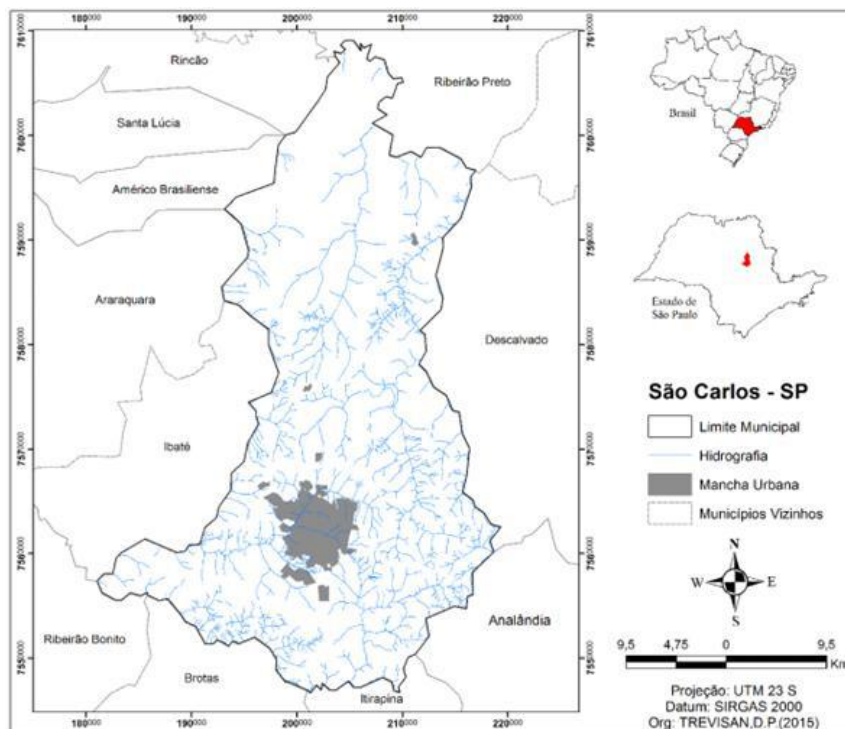
minimização, depreciação e acúmulo de erros para geração de mapas, tanto a acurácia de dados posicionais no plano X, Y quanto para Z de dados altimétricos.

Este trabalho teve como objetivo, a análise estatística dados altimétricos dos diferentes sensores (SRTM, COPERNICUS DEM, ALOS PALSAR, TopoData, NASADEM, TERRASAR-X e ASTER). Da mesma forma, realizar análise de subprodutos dos MDEs (orientação de vertente), dos diferentes sensores (SRTM, COPERNICUS DEM, ALOS PALSAR, TopoData, NASADEM, TERRASAR-X e ASTER), verificando qual Modelo possui maior acurácia, determinando quais subprodutos dos MDEs possuem melhor acurácia para o Município de São Carlos. Análise consistiu em realizar uma análise estatística dos dados altimétricos obtidos de cada um dos MDE com testes binários entre os dados de altimetria com Teste T de Student e ANOVA, os subprodutos como os: (i) Mapas de Orientação de Vertente foram gerados no intuito de demonstrar a vertente predominante dos oito MDEs e os (ii) Perfis Altimétricos foram obtidos dos oito MDEs diferentes para demonstrar que diferenças altimétricas e posicionais.

2. Metodologia

A área de estudo utilizada neste trabalho é o Município de São Carlos (Figura 1), localizado na região central do Estado de São Paulo, entre as coordenadas 47° 30' e 48° 30' Longitude Oeste e 21° 30' e 22° 30' Latitude Sul, mais precisamente no final da Serra do Itaqueri. Possui altitude variável, encontrando seu ponto mais elevado (900 metros) na Vila Nery, no sítio urbano de São Carlos, e o mais baixo, 544 metros, nas imediações da estação Santo Inácio.

Figura 1 - Localização Geográfica do Município de São Carlos (SP).



Fonte: Trevisan e Moschini (2016).

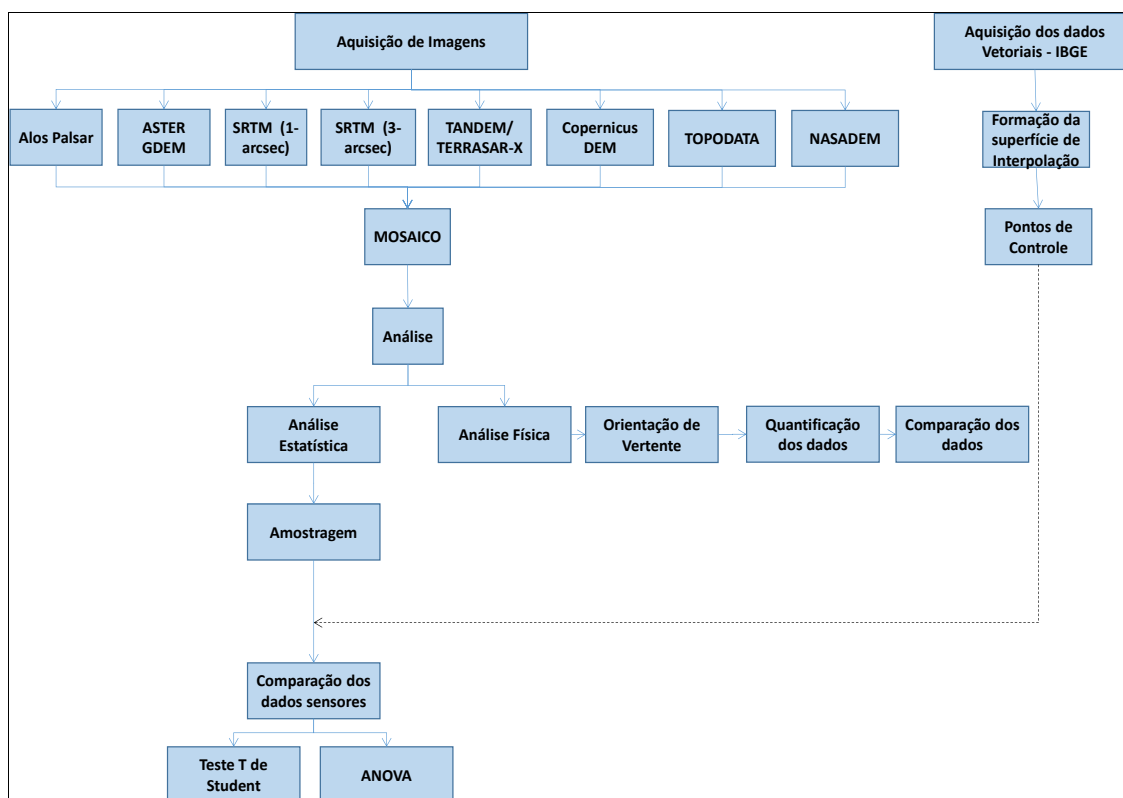
Segundo Oliveira (1996), o Córrego do Monjolinho nasce na borda da cuesta localizada no setor sudeste da cidade de São Carlos, em altitude superior a 900 metros, segue inicialmente a norte, percorrendo o reverso da cuesta e posteriormente a oeste e sul e, finalmente, atinge a Cachoeira do Monjolinho.

O município está localizado sobre o divisor de águas que limita as bacias hidrográficas do Rio Mogi-Guaçu e Tietê, fato associado à sua localização elevada no Estado. Em razão disso, a maioria dos cursos d'água que drenam São Carlos e a totalidade dos que drenam a área urbanizada, têm suas nascentes localizadas no município.

A análise divide-se em duas vertentes (Figura 2), a primeira delas é decorrente da avaliação matriciais provenientes dos subprodutos do MDE e análise estatística (T de Student e ANOVA) dos binômios formados pelos pares sensores de dados obtidos de Pontos de Controle (PCs) definidos a partir de uma camada interpolada de curvas de nível. A análise estatística em fase concomitante consiste na análise binária (par à par) das amostras de altitude.

As etapas para obtenção dos MDEs provenientes dos sensores SRTM, COPERNICUS DEM, ALOS PALSAR, TopoData, NASADEM, TERRASAR-X e ASTER, dividiu-se em (Figura 2): *Download* (obtenção) dos dados dos MDEs para a área de interesse; Pré-processamento dos dados; Validação da acurácia altimétrica dos MDE de interesse

Figura 2 - Metodologia de Comparação de dados Altimetria, matricial e estatística.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2022).

Os dados do SRTM 3 tratados pela *The CGIAR Consortium for Spatial Information* (CGIAR-CSI, 2008) para preenchimento dos gaps de informações os “buracos sem dados”, e o ASTER GLOBAL DEM 2 (Esse produto foi criado com o processamento de 1,3 milhões de arquivos de cenas ASTER, o qual é um sensor a bordo do satélite TERRA, com capacidade de operar no modo estereoscópico com as bandas 3N (*Nadir*) e 3B (*Backward*), obtendo dados de elevação da superfície) foram obtidos na página do *United States Geological Survey* (USGS), enquanto o SRTM 3, NASADEM foi obtido do sítio da agência espacial Norte Americana (NASA). Os dados ALOS PALSAR foram obtidos na página *Alaska Satellite Facility*. TANDEM/ TERRASAR-X da página *Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt German Aerospace Center*. E as imagens interpoladas do TopoData do endereço do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE). Em comparação com o tratamento de dados TANDEM/TERRASAR-X, foram obtidas imagens provenientes do Catálogo PANDA de acesso à dados do

Componente Espacial COPERNICUS, permitindo consultas de dados MDE e uma ampla visão de subprodutos de dados CDS (*Coordinated Data Access System*) e EO (*Earth Observation*) e CCM (*Copernicus Contribution Mission*) com as imagens formadas em um mosaico, escolhidas pelo traçado de um polígono cujo fechamento perpassava os limites do município de São Carlos.

O MDE do Projeto TopoData (INPE, 2009), modelo resultante do processamento do MDE do SRTM original, buscou incluir informações onde antes existia ausência de dados. Além disso, a resolução espacial original do SRTM, que é de 90 metros foi reamostrada para 30 metros, a partir de interpolação. A Tabela 1 sintetiza as características mais relevantes dos MDEs que foram estudados neste trabalho.

Tabela 1 - Modelos Digitais de Elevação em estudo.

MODELO	RESOLUÇÃO ESPECIAL	MÉTODO DE AQUISIÇÃO
SRTM - 1	90 metros	RADAR
SRTM-3	30 metros	RADAR
NASADEM	30 metros	RADAR
ASTER GDEM2	30 metros	Imagens ortoretificadas
ALOS PALSAR	12,5 metros	RADAR
TERRASAR - X	90 metros	RADAR
COPERNICUS DEM	90 metros	RADAR
TopoData	30 metros	RADAR

Fonte: INPE (2009).

Dentre os diversos MDE disponíveis (tabela 1), dentre os gratuitos estão o SRTM-3, o ASTER GLOBAL DEM2, o COPERNICUS, o ALOS PALSAR, o TopoData, e o BARE-EARTH SRTM. Sendo a resolução espacial (capacidade que cada sensor ou cada conjunto sensor possui em detectar e captar objetos na superfície terrestre, quanto melhor a resolução espacial, melhor serão identificados os objetos captados). O SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) e o ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer*) GLOBAL DEM (*Digital Elevation Model*) 2 possuem uma resolução de 30 m, enquanto os sensores dos sistemas ALOS PALSAR (*Advanced Land Observing Satellite-1*) PALSAR possuem resolução espacial de 12,5 metros, com esta finalidade, não menos importante, o BARE-EARTH SRTM possui resolução espacial de 90 metros.

Nos MDEs são complexas as relações entre resolução espacial, largura do pixel e escala, existindo diferentes e divergentes propostas para tal, a escala deve ser apropriada, em função do erro associado a acurácia vertical e da dispersão das altitudes medidas no terreno.

O pré-processamento dos dados, trouxe da preparação da base de dados *raster*, a partir da aplicação de ferramentas de geoprocessamento a construção de possíveis mosaicos para formação do MDE do município de São Carlos; formando um recorte dos dados para a região geográfica de interesse e a compatibilização dos dados para um sistema geodésico de comum.

Os arquivos vetoriais provenientes do IBGE em escala de 50.000 estão disponíveis no formato de vetores consolidados em ferramentas CAD, necessitou-se converter arquivos *dgn* para *shapefile* (*MicroStation*® para ESRI®), na aplicação OSGeo4W, personalizou-se um novo Sistema de Coordenadas em função da SRC Córrego Alegre 23S alterando a unidade de metro para km, coincidindo as curvas de nível limite municipal de São Carlos (das Cartas Hipsométricas disponíveis no IBGE, de Ibaté, Descalvado, São Carlos, Corumbataí, Porto Pulador, Ribeirão Bonito e Luis Antônio).

Os vetores provenientes do Banco de Dados do IBGE precisaram ser tratados por inconsistências: (i) curvas de nível segmentadas; (ii) bordas das cartas Ibaté, Descalvado, São Carlos, Corumbataí, Porto Pulador, Ribeirão Bonito e Luis Antônio não estavam no mesmo fuso, logo, foi necessária a reprojeção para Sistema Real de Coordenadas no Fuso 23 do Hemisfério Sul; (iii) perda de atributos das altitudes das curvas de nível, etapa que pode ser corrigida pelas ferramentas provenientes da Diretoria de Serviços Geográfico do Exército Brasileiro (*DSG tools*), com a aplicação Linha Cotadora, estabelecendo-se uma ordem de edição (ascendente ou descendente) com equidistância, de 20 metros (distância para as curvas de nível na escala de 50.000), etapa fundamental para evitar acúmulo de erros na fase interpolação posterior.

O processamento dos MDEs com as fontes do SRTM, ASTER, TopoData, COPERNICUS DEM e ALOS PALSAR serão obtidos no QGIS versão 2.18 com auxílio da aplicação TAUDEM. A comparação dos dados físicos foi realizada por uma base de cartas vetoriais do IBGE para a região de São Carlos, permitiu um adensamento geométrico, capaz de fornecer dados por intermédio de interpolação IDW, com a ponderação do inverso das distâncias (considerando os pontos mais próximos os mais similares). Gerada a camada de formato *raster*, utilizou-se a aplicação *pont sampling tools* do QGIS, pela camada vetorial em formato ponto.

A aplicação TAUDEM foi capaz de gerar a partir dos dados matriciais de altimetria dos sensores SRTM, ASTER, TopoData, COPERNICUS DEM e ALOS PALSAR, subprodutos como mapa de declividade, orientação de vertente, mapa hipsométrico, mapa sombreado, delimitação de bacias hidrográficas, lineamento das redes de drenagem e curvas de nível.

Do mosaico formado pelos MDEs, SRTM, ALOS PALSAR, TopoData, TERRASAR-X, COPERNICUS DEM e ASTER gerou-se com interpolação bilinear uma camada amostral gerada pelos vetores obtidos do IBGE, camada coincidente para que assim, os valores resultantes de altitude pudessem ser comparados, para cada mosaico a camada amostral foi a mesma, tanto em número quanto posição geográfica.

O MDE gerado a partir dos dados dos diversos sensores SRTM, ASTER, TopoData, COPERNICUS DEM e ALOS PALSAR. Em recorte de camada no limite municipal de São Carlos. O tratamento consistiu a princípio preencher as depressões e picos do MDE destoantes, que poderiam implicar na indicação da interrupção do fluxo d'água. Os valores das tangentes podem ser obtidos simplesmente, o processo ocorre por intermédio da inclinação média entre a célula central e as 8 células circundantes. Assim, foram utilizadas apenas as tangentes positivas, ou seja, que representem ângulos entre a célula central e as células de menor cota, situação tendencial que demonstra para que direção o fluxo se movimentaria.

O cálculo da malha de elevação de áreas planas pode ser considerado por intermédio da adoção das primeiras células analisadas na malha, algoritmos realizam o cálculo no sentido horário, de forma sucessiva e quando compartilham o valor da referida inclinação, o fluxo pode ser considerado como o fluxo adotado em células sucessoras. Ou seja, de acordo com os métodos de cálculo, ocorre a condução do fluxo para fora das zonas de maior elevação, seguindo a direção que elas determinam, delimitando a extensão original das áreas planas, determinando limites, eliminando células espúrias, favorecendo a aplicação do algoritmo (explicado adiante), reduzindo o tempo de aplicação de cálculo.

No estudo, foram adotadas imagens onde as aplicações, com algoritmos numéricos de varredura, geraram codificação de fluxo assimilando-o à movimentação d'água em 8 diferentes direções, sendo que a codificação ocorre por intermédio dos dados de altimetria em que os fluxos de direcionamento de água são representados por pixels dos maiores valores para os menores. No fim desta etapa ocorreu a identificação dos divisores de águas em que é possível definir a área de contribuição e a formação dos leitos fluviais. Assim, se um pixel central estiver cercado por pixels de maior altitude, a água permaneceria sem fluxo. Situação que também pode ser considerado uma inconsistência são os pixels circundados por pixels mais baixos provocam erros nos algoritmos do TAUDEM, pixels espúrios ou que contrastam com pixels vizinhos são consideradas discrepantes (anomalias), seja ela um ponto baixo ou alto e devem ser preenchidas para geração da linha de Direção de Fluxo, determinada por este algoritmo, denominado *Deterministic 8 (D8)* que considera a inclinação mais íngreme para linha de fluxo,

assim, foi realizada pelo processamento de uma grade de pixels com a função de direção de fluxo seguida de acúmulo de fluxo.

Utilizando a aplicação *point sampling tool*, coletou-se do MDE informações Altimétricas para as diversas camadas *rasterizadas* obtidas de programas espaciais como o SRTM, ALOS PALSAR, TopoData, TERRASAR-X, COPERNICUS DEM e ASTER, com diferentes resoluções espaciais 12,5, 30 e 90 m. Cada etapa de aquisição de dados nos fornece uma análise visual da posição, dispersão, simetria, caudas e valores discrepantes (*outliers*), representado-os por um diagrama de caixas.

Por fim, como o grau de comparação altimétrica baseou-se em um conjunto de sete diferentes sensores orbitais, SRTM, ALOS PALSAR, TopoData, TERRASAR-X, COPERNICUS DEM e ASTER, analisou-se estatisticamente os dados obtidos de altitude com o ANOVA e teste T de Student, aplicados a uma distribuição bi-caudal com nível de significância de 5%. Optou-se pela análise devido à origem amostral das altitudes obtidas no IBGE, apurou-se o binômio dos pares sensores (par à par) os dados de altimetria para verificar consistências, posto que as altitudes obtidas do IBGE passaram por transformações vetoriais que podem aumentar erros e diminuir a confiabilidade na obtenção dos dados, sendo que os dados do IBGE são provenientes de Modelos Numéricos do Terreno (MNT) e passam por técnicas comuns às descritas nesta metodologia.

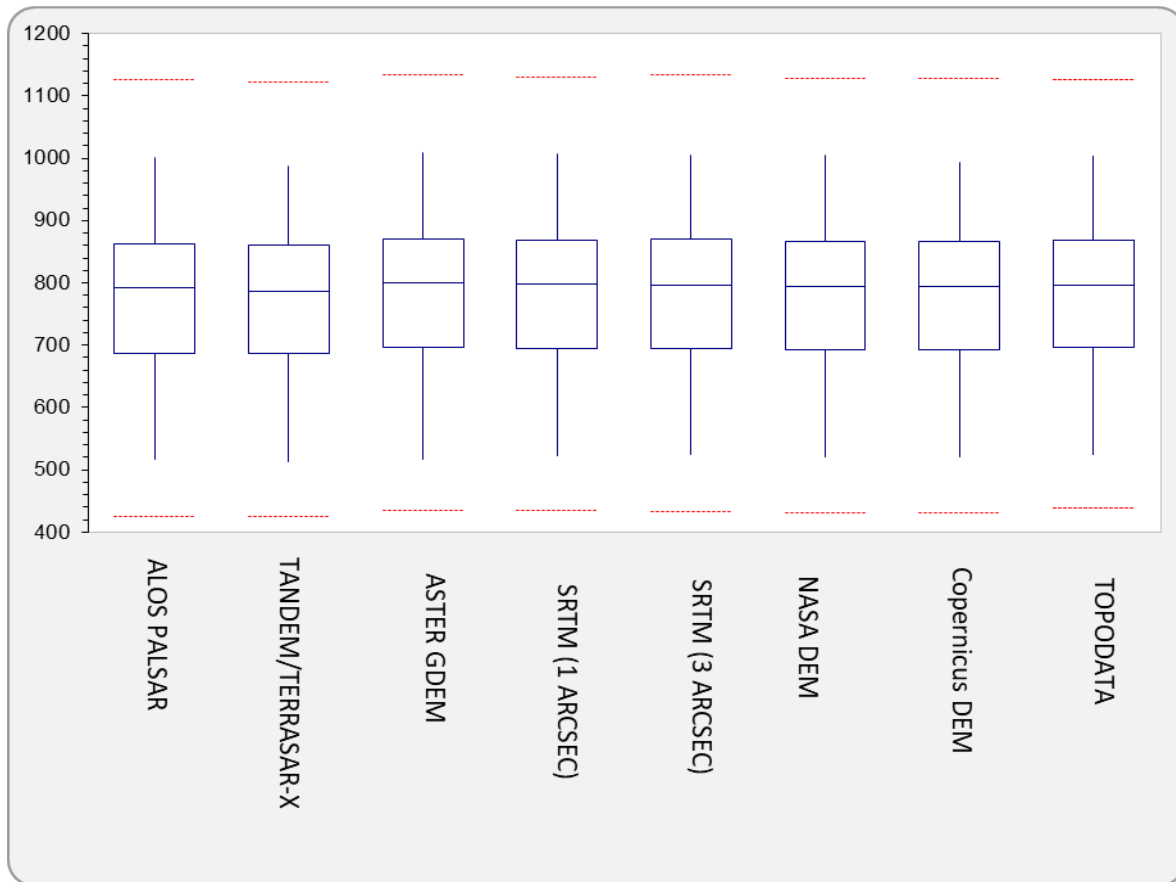
3. Resultados e Discussão

O teste T de Tukey é um teste rigoroso de comparação rigoroso de média mais utilizado para comparar todo e qualquer contraste entre duas médias de tratamentos. Contudo, quando o experimento tem um número elevado de tratamentos, não é aconselhável o seu uso. O teste T é mais exato quando o número de repetições das médias dos tratamentos avaliados é igual.

A partir taxa de erro para os conjuntos em teste de 0,05 que o teste de Tukey determinou quais valores altimétricos são estatisticamente próximos. Em geral, na análise dos dados do processo todos os valores de, ou seja, a significância do resultado das análises mostrou-se verdadeira, ou seja, superior ao nível de significância de 5%. Destarte, os resultados da correlação deveriam apresentar 90%, indicando uma boa correlação entre os dados altimétricos obtidos das fontes de dados ALOS PALSAR, NASA DEM, TopoData, SRTM, COPERNICUS DEM, TERRASAR-X e ASTER.

A distribuição dos valores dados ALOS PALSAR, NASA DEM, TopoData, SRTM, COPERNICUS DEM, TERRASAR-X e ASTER obtidos dos 365 PCs oriundos do *point sampling tools* foram estatisticamente analisados, a discrepância, obtidos pela distribuição gráfica comparativa da posição amostral (figura 3) com a indicação demonstra que os valor amostrais, representados pelo percentual do primeiro, segundo e terceiro quartil, correspondente a respectivamente a 25, 50 e 75 da amostragem não apresentam diferença considerável.

Figura 3 - Análise de dispersão de dados sensores e *outliers* dados ALOS PALSAR, NASA DEM, TopoData, SRTM, COPERNICUS DEM, TERRASAR-X e ASTER.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2022).

O emprego de métodos estatísticos nos trabalhos científicos como instrumento extremamente útil na organização e interpretação de dados. Sendo assim, proporcionou-se uma avaliação adequada da variabilidade observada nos dados georreferenciados, segundo Matsumoto e Flores (2012) podem ser empregadas em análises métricas de relações espaciais, como estatística espacial. Comparam-se as situações experimentais e permitem determinar a margem de erro que estão associadas às amostras georreferenciadas. No entanto, a dispersão dos dados (Figura 3), calculada pela diferença entre o terceiro e o primeiro quartil, que trazem a variabilidade de dados (*outliers*) demonstra que não há variação considerável entre os dados sensores.

Nos testes T de Student e Análise de Variância (ANOVA) com um nível de significância de 5%, tanto a avaliação par à par como na ANOVA, a comparação de dados altimétricos demonstrou boa correspondência nestes níveis de significância em que todas foram aceitas. Conforme os resultados do teste Binário (Tabela 2) os dados provenientes do Sensor TANDEM apresentaram as mais baixas correlações, em contrapartida as melhores correlações ficaram com os dados da missão SRTM.

Tabela 2. Análise Binária, melhores correlações binárias

Par sensor analisado	Teste T de	Par sensor analisado	Teste T de
TopoDataXSRTM30	0,949707	ASTERXNASADEM	0,681284
NASADEMXCOPERNICUS	0,948365	ALOS PALSARXNASDEM	0,673538
NASADEMXSRTM90	0,921437	ASTERXCOPERNICUS	0,633865
SRTM30XASTER	0,912894	ALOS PALSARXSRTM90	0,603052
TopoDataXSRTM90	0,88877	ALOS PALSARXTopoData	0,509248
COPERNICUSXSRTM90	0,87003	ALOS PALSARXSRTM30	0,470777
ASTERXTopoData	0,862797	COPERNICUSXTANDEM	0,447532
SRTM30XSRTM90	0,839507	NASADEMXTANDEM	0,410658
TopoDataXNASADEM	0,811506	ALOS PALSARXASTER	0,405764
SRTM30XNASADEM	0,763522	SRTM90XTANDEM	0,356539
COPERNICUSXTopoData	0,761269	TopoDataXTANDEM	0,287912
ASTERXSRTM90	0,754789	SRTM30XTANDEM	0,261411
ALOS PALSARXCOPERNICUS	0,720735		
COPERNICUSXSRTM30	0,714256		
ALOS PALSARXTANDEM	0,689449		

Fonte: Elaborado pelos Autores (2022).

Comparando subprodutos do MDE com as curvas de nível do IBGE Chagas et al. (2010) apresentaram uma boa concordância com os MDEs ASTER e SRTM, no entanto, com os dados de altimetria do Sistema que é referência nacional, o IBGE em cartas de escala de 1:50.000 foi muito baixa.

Em uma avaliação de MDE para delimitação de Bacias Hidrográficas dos sensores ASTER, SRTM e ALOS PALSAR por intermédio da aplicação de modelos estatísticos, tendo como Referência os PCs, Duarte et al. (2019) ressalta que os erros de SRTM apresentaram maior escala, por outro lado, no sistema ASTER constatou-se a presença de pixels espúrios ou nulos, e, dentre os erros os sensores ALOS PALSAR apresentaram os menores erros.

Por outro lado, Braz (2018) em uma análise visual de subprodutos do MDE dos sensores SRTM (banda C e X), TopoData e ASTER GDEM, afirma que o sensor SRTM-X apresenta a melhor definição das formações geomorfológicas com menor quantidade de ruído, quando comparado com o sensor ASTER GDEM.

O trabalho de Melgaço Souza Filho e Steinmayer (2005) fizeram uma comparação entre dois MDEs provenientes de sensores ASTER e SRTM e indicam que a geração destes Modelos e subsequentemente dos subprodutos dos MDEs dependem da resolução espacial horizontal e vertical, sendo que a operação matricial de subtração do *raster* de TERRASAR-X, NASADEM, COPERNICUS, ASTER, TopoData, ALOS PALSAR, SRTM30 SRTM 90, operação ASTER – SRTM, e, SRTM – ASTER demonstrou que tais sensores apresentam alta correlação.

A análise física do terreno a partir dos valores de elevação do MDE inerente a sua boa disposição com maior nível de detalhamento e precisão comparadas às representações clássicas, permitiu obter resultados com maior amplitude, tanto em quantidade e qualidade.

Os subprodutos dos MDE possuem um formato matricial em *raster*, a sua principal desvantagem do modelo reside na

discretização do espaço que lhe dá origem, implicando em uma perda de precisão. Estas elevações, oriunda de um plano contínuo podem ser representadas por intermédio de malha *raster*, enquanto parâmetros hidrológicos não aderem a tais formatos, devem ser usados de forma que os formatos de todos os dados de entrada devem desenvolver e ser compatíveis com os usos e finalidade. Com o que foi coletado nesta análise e com algumas informações obtidas sobre modelos vetoriais, da relação (subproduto) *raster* - vetor deve-se tirar proveito das aplicações práticas para uma análise mais refinadas com a comparação altimétrica do perfil dos cursos d'água das diferentes fontes de dados MDE.

Trabalhar com precisão centimétrica da resolução vertical para boa parte das aplicações hidrológicas para Olaya (2004) é suficiente, no entanto, a precisão igual ou inferior a um metro é insuficiente. Neste contexto, destaca-se a dependência destas aplicações com o relevo proveniente do MDE, conforme observou-se, as áreas de relevo mais acentuadas poderiam ser caracterizadas com maiores resoluções espaciais e menores tamanhos de célula, por outro lado, em células de tamanhos mais acentuados a resolução vertical pode ser apropriada para terrenos mais aplainados.

Para Macêdo e Surya (2018) os erros de deslocamentos nos valores de elevação conforme realizada análise amostral foram superiores nos modelos com maiores resoluções espaciais, característicos de processos de interpolação de dados brutos de 90 m para 30 m como é o caso do TopoData. Em modelos de baixa resolução, fundos de vale e formações abruptas não puderam ser computadas.

Marion, et al., (2015) analisam 2 perfis morfológicos constituídos por regiões de topo de morro passando por encosta e fundo de vale, compararam-se os perfis gerados por fotogrametria e pelos modelos oriundos de Cartas Topográfica interpolados do Sistema TopoData e SRTM (1 e 3 arcsec), onde notaram que as maiores escalas geraram perfis anguloso não fidedignos com relevo real, sendo as melhores representações provenientes do TopoData e SRTM (1-arcsec).

Neste âmbito, a interpolação se realiza em uma distribuição de malhas ou por intermédio de áreas de influências formadas por triangulação. No geral, dados referentes ao posicionamento da célula amostral formam uma representação matemática consolidada em uma matriz. Produto que fornecem outras informações como o tamanho da célula, resolução e níveis de cinza. Já com a triangulação são obtidas aproximações e criação de vértices fictícios e representações de inclinação e exposição de face dos triângulos tentando atender o formato de um triângulo com os ângulos internos iguais.

Macêdo e Surya (2018) utilizam índices para quantificar a heterogeneidade do terreno e constataram que a resolução espacial dos modelos acabou influenciando na obtenção de índices de rugosidade do terreno, mostrando uma relação inversamente proporcional, demonstrando que quanto maior a resolução menor a rugosidade do terreno, assim, os dados dos sensores ALOS PALSAR demonstraram-se mais fiéis para mapeamento morfológico em Mesoescala, a única contrapartida dos dados com melhor resolução espacial é a capacidade de processamento dos dados.

Paradella, et al., (2021) na busca de fontes de dados para MDE na Amazônia Brasileira determinam que os MDE gerados pelos sensores ASTER foram superiores aos dados de SRTM (3 arcsec), entretanto, devida importância foram dadas aos dados gratuitos e de fácil obtenção, o SRTM (3 arcsec) nesta situação é uma boa alternativa, principalmente em áreas de planícies e montanhosos.

O MDE é um subproduto que permite a elaboração de uma série de produtos cartográficos para análise do meio físico, como mapa de declividade, orientação de vertente, mapa hipsométrico, mapa sombreado, delimitação de bacias hidrográficas, lineamento das redes de drenagem e curvas de nível.

Os resultados foram analisados em cada fonte (ALOS PALSAR, NASA DEM, TopoData, SRTM, COPERNICUS DEM, TERRASAR-X e ASTER), conforme o método proposto, de modo que seja possível apontar o MDE mais preciso para viabilizar a referida produção cartográfica no município de São Carlos.

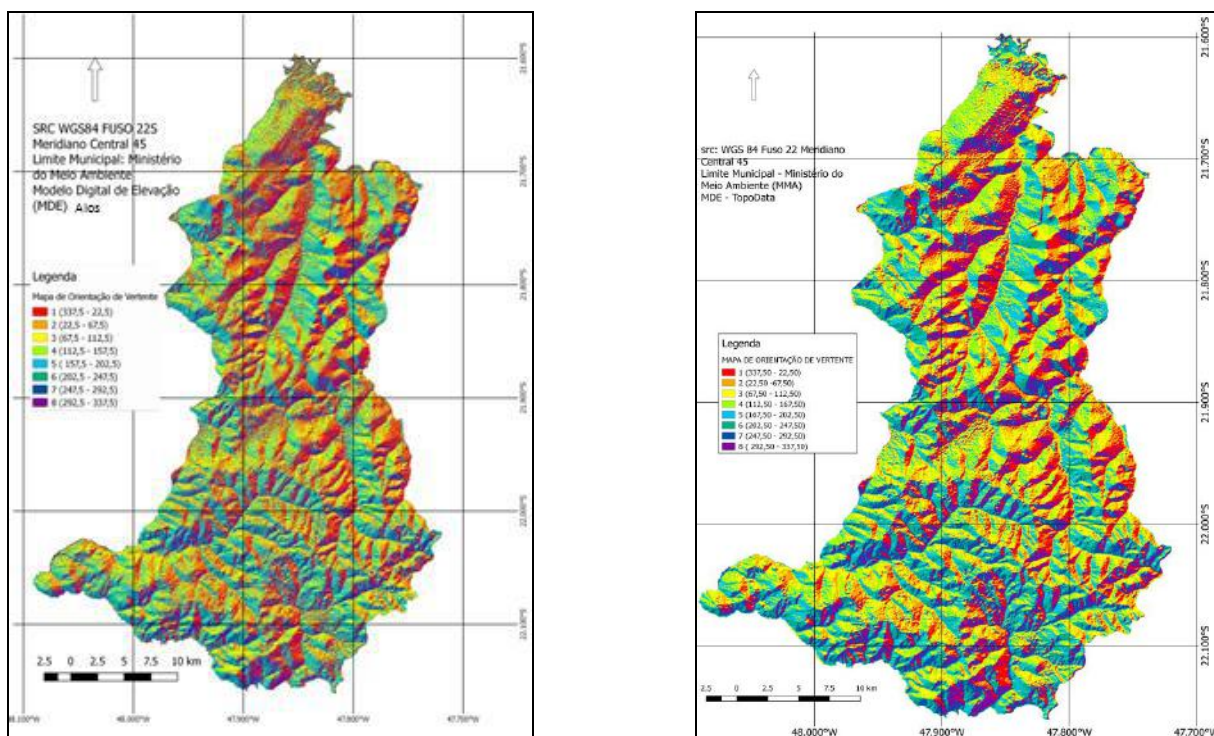
Os mapas de Orientação de Vertente servem de subsídios para obras de corte, aterro, movimentação de terra, servem de base para análise do perfil do terreno e um ótimo parâmetro para escoamento superficial para a hidrologia, como parâmetro

para modelos de chuva-vazão para determinação de uma lâmina de escoamento superficial em um evento de precipitação.

A quantificação da classificação apresentada para mapas de Orientação de Vertente em oito classes: Norte ($0^\circ - 22,5^\circ$; $337,5^\circ - 360^\circ$), nordeste ($22,5^\circ - 67,5^\circ$), leste ($67,5^\circ - 112,5^\circ$), sudeste ($112,5^\circ - 157,5^\circ$), sul ($157,5^\circ - 202,5^\circ$), sudoeste ($202,5^\circ - 247,5^\circ$), oeste ($247,5^\circ - 292,5^\circ$), noroeste ($292,5^\circ - 337,5^\circ$) (Figuras 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11). Para dar maior representatividade para a coleta de dados, cuidado foi tomado para se estabelecer um elo visual no intuito de trazer equivalência de linguagens, para identificar a vertente predominante e quantificar o número de *pixels* conforme classe. A angulação das classes foi mantida e a paleta de cores adotada para Orientação de Vertente (Figuras 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18 e 19) foram os mesmos utilizados para representação gráfica.

Os subprodutos dos MDE possuem características peculiares, normalmente em formato *raster*, são monocromáticas, coloridas por aplicações de falsa-cor, representam bem análises regionais de conformação do terreno (relevo). Coloração que pode ser uniforme ou gradual, com intervalos regulares definidos por EMBRAPA (2012) definem um modelo estratificado para variação da altitude do terreno

Figuras 4 e 5 - Mapa de Orientação de Vertente e área Sensor ALOS/PALSAR e TopoData.

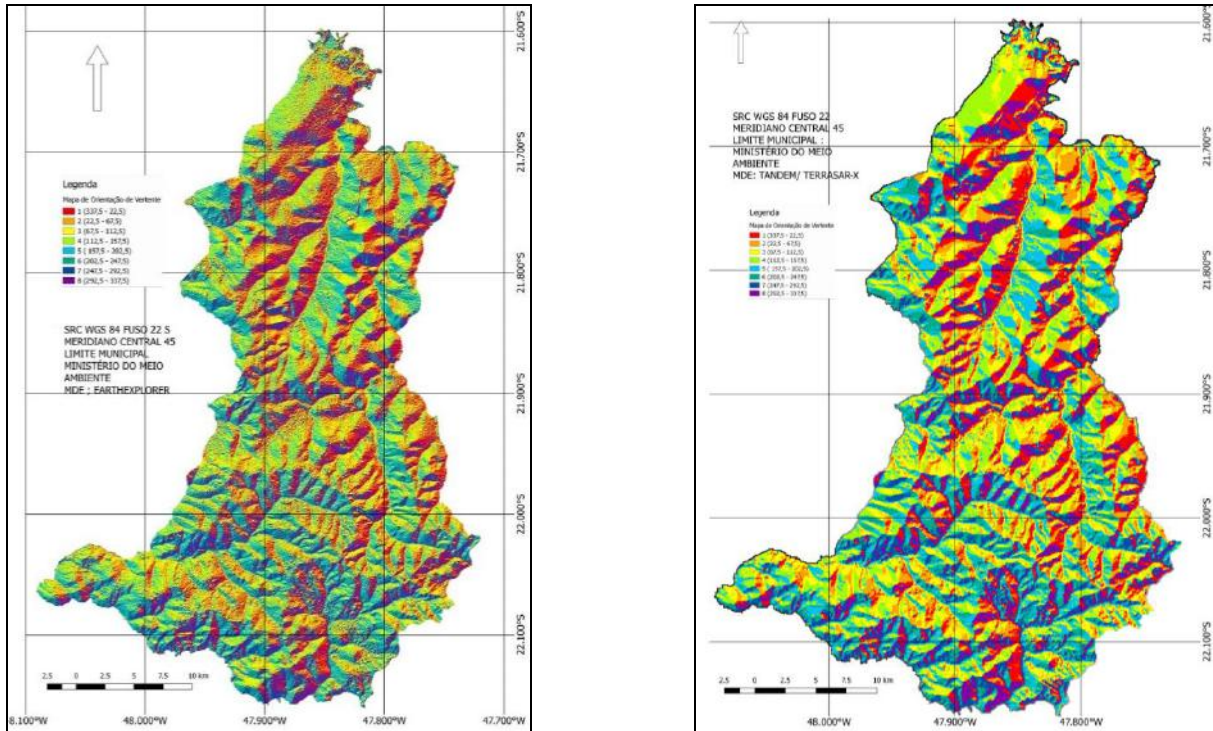


Fonte: Elaborado pelos Autores (2022).

Redes de drenagem oriundas de sensores com as maiores resoluções apresentaram nível de detalhe meândrico mais aprimorado, como o ALOS PALSAR (Figura 4). Keys e Baade (2019) demonstram como diferentes MDEs de resoluções espaciais diferentes geram diferenças na delimitação da área de drenagem de bacias hidrográficas, comparam sensores TANDEM-X, SRTM (1 e 3 arcsec), ALOS PALSAR e ASTER GDEM. Onde se afirma que os conjuntos de dados dos sensores TANDEM (Figura 7) de resolução espacial de 12 e 30 m são excelentes para um exame mais preciso da topografia, no entanto, embora mais difícil obtenção. Sendo os sensores ALOS PALSAR (Figura 4) o delineamento das redes de drenagem foi mais preciso além de possuírem disponibilidade gratuita. No entanto, demonstrou-se que as áreas de sub-bacia foram influenciadas pelas feições topográficas mais planas e menos definidas, igualmente, corroborou-se que as melhores

resoluções dos sensores TANDEM-X de 12,5 metros poderiam ser melhores do que o ALOS PALSAR para análises geomorfométricas.

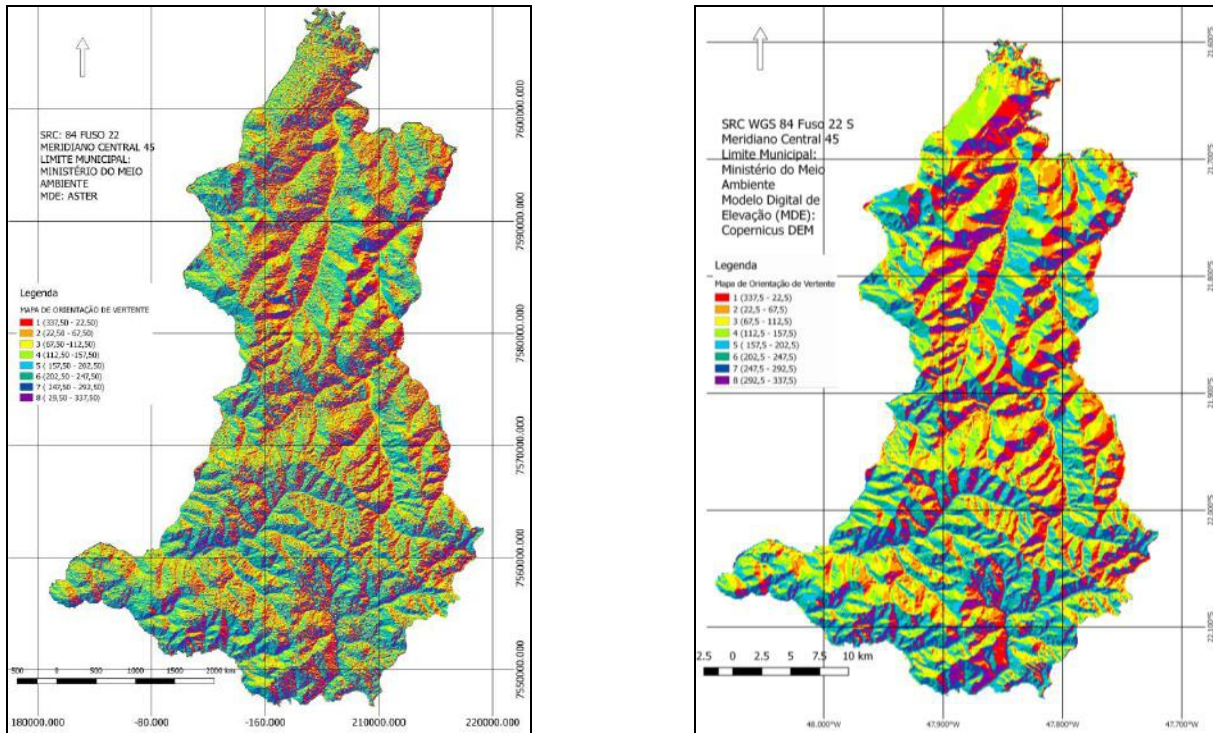
Figuras 6 e 7 - Mapa de Orientação de Vertente e área Sensor NASADEM e TANDEM/TERRASAR-X.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2022).

Paradella, et al., (2021) explicam o funcionamento de Radars de Abertura Sintética e seus usos de deformações dos terrenos (microtopografia e macrotopografia) e salientaram que o imageamento por Sistemas de Radars em razão de operar em visada lateral e com fonte de emissão e recepção no mesmo alinhamento apresentam distorções geométricas únicas, justificando a ocorrência do deslocamentos para as fontes sensores com a maior resolução espacial (ALOS PALSAR e NASADEM) (Figura 4 e 6) e tornam legítimas afirmações dos efeitos da distorção, como o encurtamento de rampa, inversão de relevo e sombra de radar (vistas à seguir na análise física), situação que pode ser sanada com a visada e imageamento em NADIR oposto para diminuir tais efeitos.

Figuras 8 e 9 - Mapa de Orientação de Vertente e área Sensor ASTER GDEM e COPERNICUS DEM.

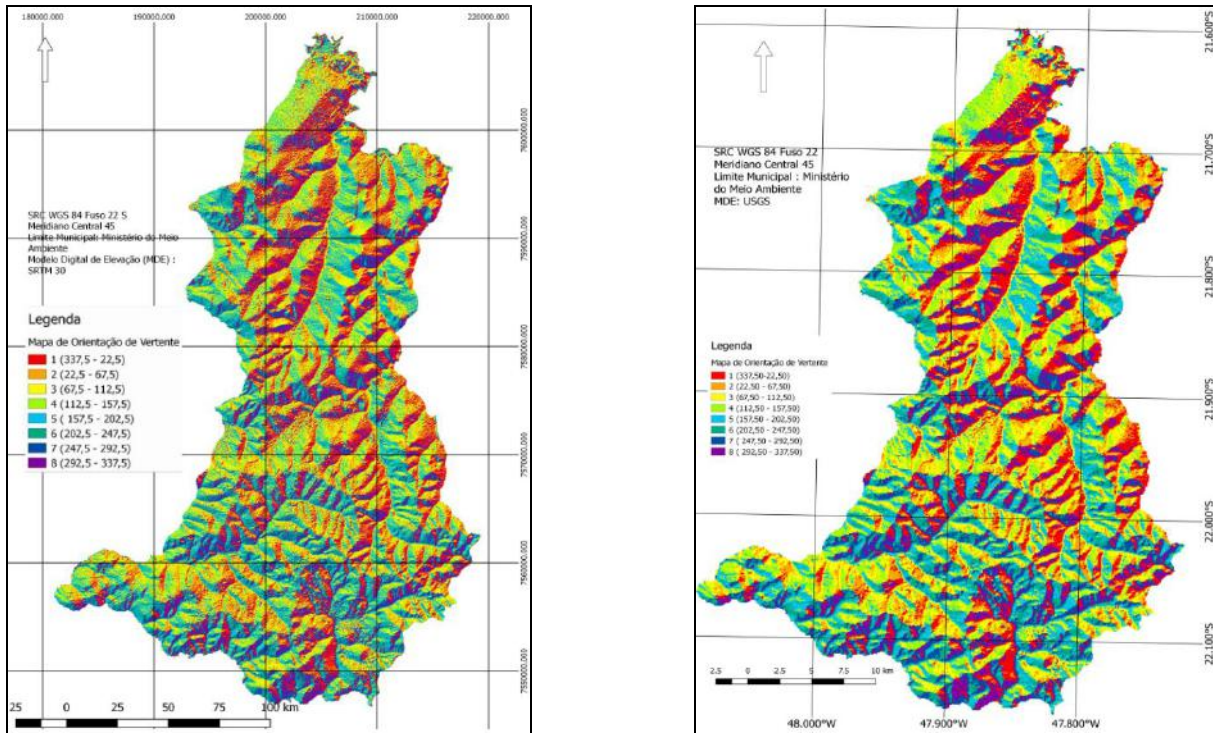


Fonte: Elaborado pelos Autores (2022).

Os Modelos Digitais de Elevação apresentam diversas aplicações no ramo das geomorfologias. Entretanto, é muito importante avaliar as vantagens e as limitações de cada, buscando os melhores resultados conforme estudo realizado. Em um estudo de análise de risco por deslizamento Meena e Nachappa (2019) utilizando três fontes sensores SRTM, ALOS PALSAR e ASTER GDEM, diferentemente do que já foi apresentado, os dados dos sensores ASTER GDEM (Figura 8) de 30 metros apresentou maior precisão.

Chagas (2010) afirma que a rede de drenagem é afetada pela presença de depressões espúrias em um MDE, em seu estudo faz uma comparação visual de redes de drenagem como dos sensores ASTER (Figura 8) e SRTM (Figuras 9 e 10), apresentam baixa correlação com redes de drenagem mapeadas, erros foram inerentes ao cruzamento de redes curvas de nível mapeadas com as redes obtidas de ASTER e SRTM, mais evidente nos sensores ASTER.

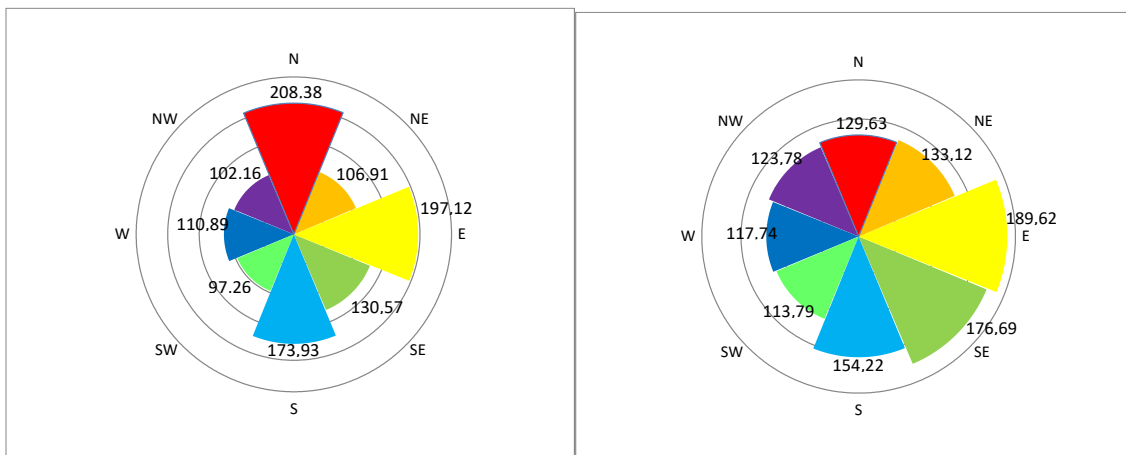
Figuras 10 e 11 - Mapa de Orientação de Vertente e área Sensor da missão espacial SRTM 30 e 90.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2022).

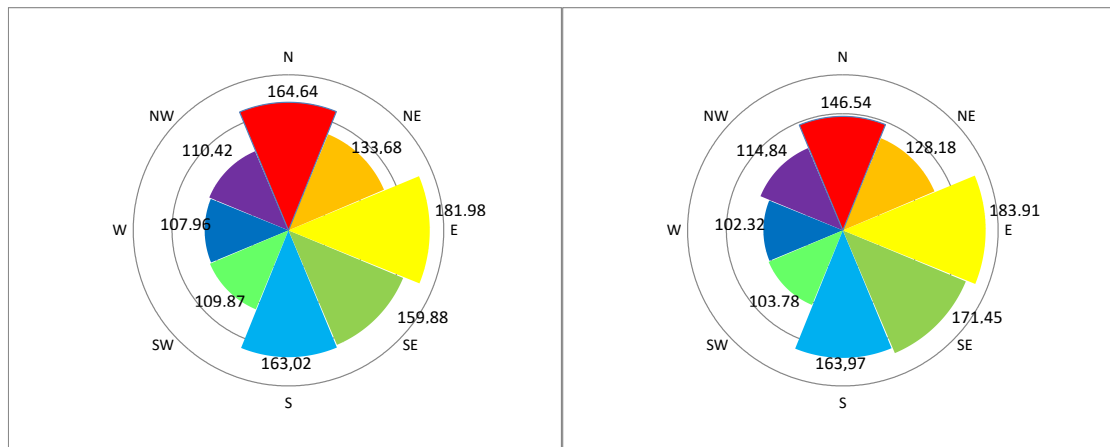
O relevo pode ser o fator determinante para ocupação humana, visto como barreira, segundo Florenzano (2008), pode dificultar a estabilização rural e urbana, impedindo o desenvolvimento de atividades antrópicas. Os dados topográficos oriundos da morfometria do terreno consideram a análise das formas e de seus processos, com tais conhecimentos é possível ter uma melhor noção sobre os seus aspectos e a sua dinâmica, permitindo compreender as formas estabelecidas em decorrência também dos fenômenos naturais, como aumento do escoamento superficial após chuvas intensas.

Figuras 12 e 13 - Relação de Orientação de Vertente e área Sensor ALOS/PALSAR e TopoData.



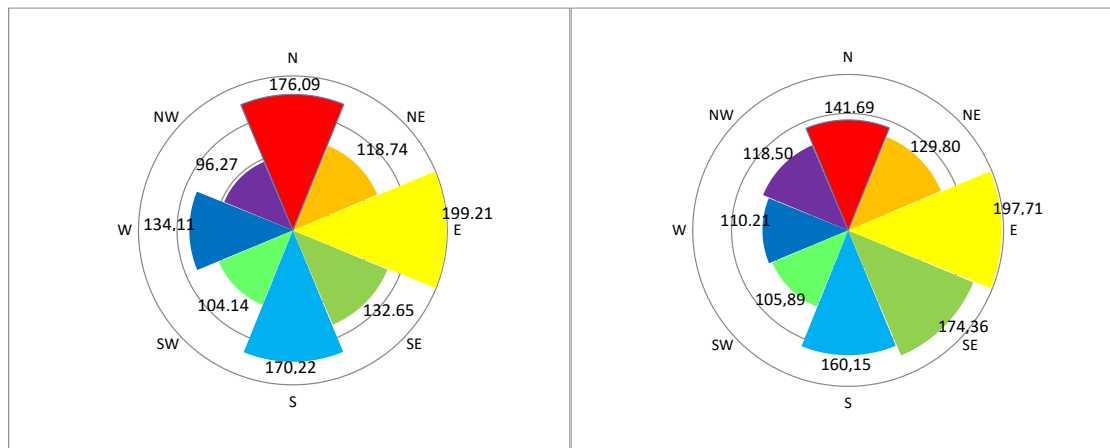
Fonte: Elaborado pelos Autores (2022).

Figuras 14 e 15 - Relação de Orientação de Vertente e área Sensor SRTM (1 arcsec) e (3 arcsec).



Fonte: Elaborado pelos Autores (2022).

Figuras 16 e 17 - Relação de Orientação de Vertente e área Sensor ASTER GDEM e COPERNICUS DEM.



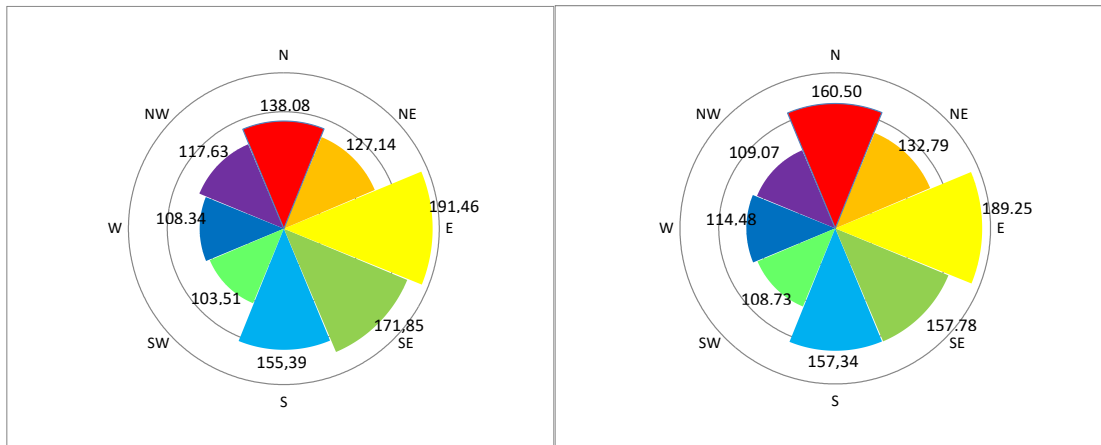
Fonte: Elaborado pelos Autores (2022).

Os MDEs ASTER e SRTM (Figuras 14, 15 e 16) apresentaram um número elevado de depressões espúrias, Apesar de serem numerosas, o número de pixels envolvidos em cada depressão é reduzido, normalmente de 1 a 2 pixels. Em poucos casos, o número de pixels é superior a 2, principalmente no processo de formação do MDE dos sensores SRTM (Chagas et al. 2010).

Pode obter-se uma boa correlação com SRTM (nas Figuras 10, 11, 14 e 15) e TopoData (Figuras 5 e 13), conforme avaliado estatisticamente (Tabela 2), enquanto os dados ASTER GDEM (figuras 8 e 16) apresentaram elevado nível de ruídos, com baixa correlação com a superfície morfológica presente nos demais MDEs. Duarte et al. (2019) puderam observar que apesar que os sensores ASTER possuam descontinuidade nos dados, ficaram em segundo lugar em termos de precisão, na frente do sensor SRTM e atrás do ALOS PALSAR no quesito da extração de atributos de área.

Os Modelos Digitais de Elevação exibem as características da topografia sobrejacente à vegetação, opta-se por sensores de origem de Satélites de Radar e Abertura Sintética como os sensores ALOS PALSAR (Figuras 4 e 12), TANDEM e TERRASAR-X (Figuras 7 e 16), permitem a identificação de feições morfológicas que podem ser mascaradas pela vegetação. No trabalho de Duarte et al. (2019) conclui-se que terreno plano, baixas elevações e com cobertura de vegetação densa não contribuem para a extração de atributos geomorfológicos de boa precisão, tais características cooperam para uma maior incidência de erros devido ao método de aquisição de imagens dos MDE.

Figuras 18 e 19 - Relação de Orientação de Vertente e área Sensor TANDEM/TERRASAR-X e NASADEM.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2022).

Mouratidis e Ampatzidis (2019) concluíram que erros de elevação dos sensores da SRTM e COPERNICUS não são dignos de atenção para superfícies planas e conforme ocorrem feições mais abruptas no terreno com inclinações até 14° podem ser considerados inconsistentes, fato que não pode ser observado nos sensores ASTER que começam com graus maiores até as rampas de 16° , COPERNICUS DEM (Figura 17), SRTM (Figuras 14 e 15) que apresentam uma ordem de grandeza semelhante com diferenças expressivas dos sensores sensor ASTER GDEM (figura 16).

O uso de diferentes MDEs no processo de delimitação de bacias hidrográficas geram incertezas que são transferidas diretamente para os resultados da modelagem hidrológica e qualquer subproduto, como o estudo de erosão, esquemas de restauração em bacias hidrológicas e outros estudos hidrológicos que dependem da área de drenagem. Portanto, os erros na delimitação da bacia hidrográfica, deveriam ser quantificados quanto à incerteza admitida, testando os resultados derivados de um MDE com resultados derivados de outro MDE (Keys & Baade, 2019).

A análise física para verificação morfométrica, conforma-se por um perfil altimétrico do terreno, aderiram a geometria formada pelo rio principal, na linha de talvegue, da nascente a foz. Assim, para comparar dados dos conjuntos sensores ALOS PALSAR, NASA DEM, TopoData, SRTM, COPERNICUS DEM, TERRASAR-X e ASTER, procurou-se compreender na distância da nascente até o ponto mais distante de sua rede de drenagem (Figura 20). Comparação demonstrou que conforme o relevo torna-se mais acentuado foram as diferenças entre os sensores. Fato que pode ser reforçado com operação matricial do perfil do terreno do maior corpo hídrico supracitado de subtração de MDEs, assim, para robustecer os resultados da análise estatística e binária de T de Student, realizou-se operação matricial de subtração par à par.

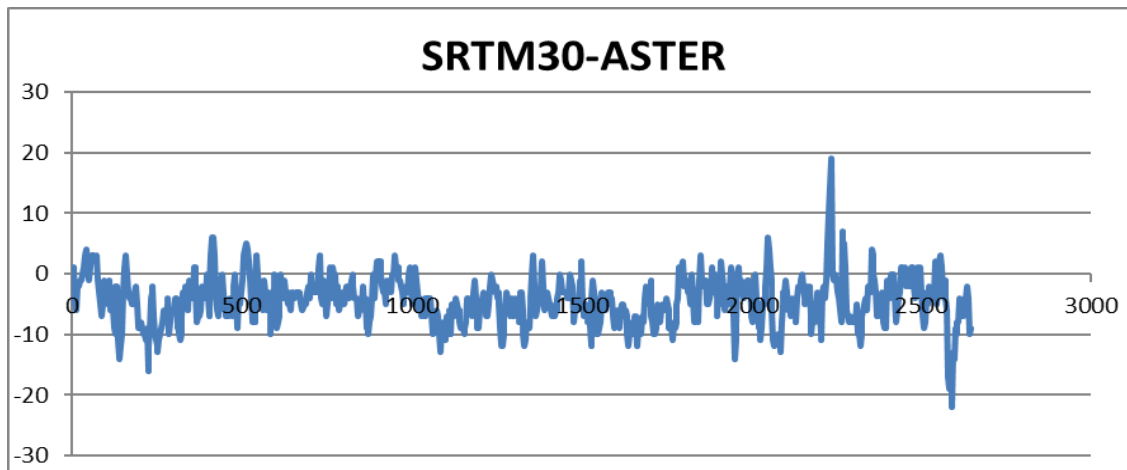
Figura 20 - Traçado do talvegue de maior extensão de São Carlos (da nascente à foz).



Fonte: Google Satélites (2022).Elaborado pelos Autores (2022).

Alguns erros na detecção podem estar relacionados à aquisição e dos Satélites de Abertura Sintética, pode existir certa predileção dos sensores conforme a geometria e orientação, Solberg, et al., (2013) indicam em um estudo de diminuição da altura de superfície de dossel arbóreo com a análise combinada de Modelos oriundos do SRTM e TANDEM-X podem mudar na obtenção do Modelo de Superfície, conforme a predominância de aquisições SRTM, mudança atribuída à orientação do ônibus Espacial *Endavour* que estava voltado para o Norte, enquanto os sensores TANDEM-X estavam voltados para Leste. Situação mais evidente em relevos montanhosos, o que pode ser comprovado na operação matricial de subtração, que pode ser evidenciado pelo Binômio ASTER-SRTM (Figura 21), do traçado do talvegue de maior extensão de São Carlos (da nascente à foz) (Figura 20) os *outliers* ocorrem em formações de relevo abruptas, relevos de montanhas ou na formação de vales.

Figura 21 - Operação Matricial de Subtração dos MDEs formados pelo binário STER-SRTM.



Fonte: Elaborado pelos Autores (2022).

Miliareisis (2008) obteve um mapa de Orientação de Vertente de dados de fonte do Sensor SRTM e estabeleceu uma relação de domínio de uso e ocupação do solo estabelecendo que a neve, floresta, zonas arbustivas e grama possuíam diferenças na elevação conforme a altura média de elevação, assim, ressalta-se que estes tipos de sensores possuem diferenças significativas, na ordem de metros e que não podem garantir a precisão centimétrica ou milimétrica que certas obras de saneamento necessitam. Do estudo, nota-se a subestimação dos dados altimétricos e o aumento nas vertentes, no sentido horário respectivamente. SE, S, SW, W e NW das quatro classes citadas.

4. Conclusão

Tanto a análise de variância quanto a física dos subprodutos e estudo de dispersão e assimetria pela plotagem do diagrama de extremos e quartis demonstram que a hipótese de desigualdade entre os valores altimétricos é rejeitada. Contudo, as operações matriciais apontam diferenças entre os binômios formados da comparação de pares sensores.

O estudo de dispersão indica que os valores de altimetria estatisticamente apresentam baixa dispersão, por outro lado, o ANOVA com os testes de significância $p > 0,05$ não confirmam que as médias amostrais estão isentas de fortes desvios. Considera-se neste aspecto, o tamanho amostral dos pontos de controle pode ser não suficiente para detectar hipótese. Como o ANOVA não acusou diferenças significativas, conclui-se apenas que não houve evidência suficientemente forte para provar que essas diferenças são significativas numericamente.

A melhor semelhança está entre os valores oriundos da comparação entre os instrumentos SRTM, TopoData e NASADEM e maior disparidade entre SRTM ASTER GDEM. Neste aspecto é importante reafirmar que os dados altimétricos disponíveis para obtenção no TopoData são provenientes de dados interpolados da missão SRTM 90, sendo que o testes de comparação de cada um binômio estatístico ou matricial não possuem diferenças significativas.

Conclui-se que a melhor escolha entre os Binômios dos sensores são os dados provenientes do NASADEM, tanto pela sua melhor resolução espacial (com exceção de ALOS PALSAR), quanto pelo resultado proveniente da análise quantitativa e visual dos subprodutos dos MDEs, como a Orientação de Vertentes.

As características locais, tais como: formações abruptas no terreno, cobertura vegetal nativa densa não contribuem para a extração de atributos altimétricos e locais com boa precisão na área de estudo, tais características levam para uma maior incidência de erros, invariavelmente do método de aquisição de imagens que em que cada MDE e seus subprodutos foram obtidos.

Nos estudos comparativos de MDEs, ao afirmar o melhor produto a cada trabalho, notou-se que as pesquisas manifestam predileção por um sistema que apresentou resultados coerentes conforme as finalidades dos dados e das necessidades de cada um e do local aplicado. Há predileção pelos dados de SRTM por sua distribuição gratuita e cobertura global. Depois nota-se certo favoritismo para os dados de ALOS PALSAR por sua melhor resolução espacial, no entanto, neste último sensor não foi possível observar eficiência na acurácia posicional, fato observado mais uma vez no binômio da análise matricial.

Quanto às comparações visuais e a estatística descritiva dos instrumentos, concluímos a pertinência quanto à similaridade entre SRTM 30, TopoData e NASADEM, e a maior diferença entre ASTER GDEM e TANDEM/TERRASAR-X. Acredita-se que a maior diferença ocorreu devido ao processo de constituição do MDE e principalmente pela resolução espacial de cada instrumento.

Para posteriores trabalhos, recomenda-se a realização de diferentes testes, para diferentes regiões. Cabe ressaltar ademais, que, os resultados (p-valor) possam ser influenciados pela quantidade de amostras, que em outros estudos pode/deve ser diversificada da quantidade utilizada. O presente trabalho serviu para direcionar os procedimentos metodológicos para futuros estudos analíticos desta natureza e contribuir para nortear novos caminhos de exploração de valores altimétricos de MDEs, por conseguinte realizar as melhores escolhas para os projetos básicos de saneamento básico. Estudos futuros deverão ser realizados com o grau maior de detalhamento, por exemplo, de redes de drenagem dos subprodutos do MDE para aderência à análise hidrológica de bacias hidrográficas e gestão de recursos hídricos.

Referências

- Abraão, N. (2020). *Aplicações GIS para empresas de Saneamento Básico*. Ed. ABES. 441 p
- Brasil. Congresso. Senado. (1984). Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. *Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional*. 1. ed. Brasília, DF: Casa Civil, 20 jun. 1984.http://legislacao.planalto.gov.br/legisla/legislacao.nsf/Viw_Identificacao/DEC%2089.817-1984?OpenDocument.
- Braz, A. M. (2018). Análise da diferença entre dados altimétricos em uma bacia hidrográfica através da comparação entre modelos digitais de elevação. *Ateliê Geográfico, Goiânia*, 12(1), 71-96.
- Chagas, C. S., et al. (2010). Avaliação de Modelos Digitais de Elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. *Campina Grande, Agriambi*, 14(2). http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010000200014.
- Duarte, M. L., et al. (2019). Evaluation of digital elevation models in the delimitation of hydrographic basins in the south of Amazonas region. *Journal Of Hyperspectral Remote Sensing*. 99-107. https://www.researchgate.net/publication/340242485_Avaliacao_de_Modelos_Digitais_de_Elevacao_na_delimitacao_de_bacias_hidrograficas_na_regiao_Sul_do_Amazonas.
- Egg, G. C., Gripp Junior, J., & Medeiros, N. das Graças. (2013). Geração de Modelos Digitais de Superfície compostos utilizando imagens do sensor Prism/Alos. *Revista Brasileira de Cartografia*, Viçosa, 5(65), 951-966, <http://www.seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/download/43873/23137/0>.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2012). *Análise Morfométrica de Bacia Hidrográfica – Subsídio à Gestão Territorial Estudo de caso no Alto e Médio Mamanguape*. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/84896/1/0000010346-BPD-Analise-morfometrica.pdf>.
- Fathy, I. et al. (2019). Effect of Topographic Data Accuracy on Watershed Management. *International Journal of Environmental Research And Public Health*, [S.L.], 16(21), 4245-4266, 1. MDPI. <https://www.mdpi.com/1660-4601/16/21/4245/html>.
- Florenzano, T. G. (2008). Sensoriamento Remoto para Geomorfologia. In: Florenzano, T. G. (Org). *Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais*. São Paulo. Ed. Oficina de Textos.
- INPE. Instituto de Pesquisas Espaciais (2009). *TopoData: banco de dados geomorfométricos do brasil*. Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil. <http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>.
- Iorio, M. M., et al. (2012). Avaliação de Modelos Digitais de Elevação extraídos de imagem ALOS/PRISM e comparação com os modelos disponibilizados gratuitamente na web. *Mato Grosso do Sul. Geociências*, 31(4). <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/7222>.
- Keys, L., & Baade, J. (2019) Uncertainty in Catchment Delineations as a Result of Digital Elevation Model Choice. *Hidrology. Jena*, 1-22. <https://www.mdpi.com/2306-5338/6/1/13/htm>.

- Littidej, P., & Buasri, N. (2019). Built-Up Growth Impacts on Digital Elevation Model and Flood Risk Susceptibility Prediction in Muaeng District, Nakhon Ratchasima (Thailand). *Water*, [S.L.], v. 11, n. 7, p. 1496-1525. MDPI <http://dx.doi.org/10.3390/w11071496>: <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/7/1496>.
- Macêdo, R. J. A. (2018). Comparação entre Modelos Digitais de Elevação dos Sensores SRTM E ALOS PALSAR Para Análise Digital De Terreno. *Revista Contexto Geográfico*, [s. l.], 3(6), 47-55. <https://www.seer.ufal.br/index.php/contextogeografico/article/view/6968>.
- Marion, A. F., Santos, E B., & Hendges, E R. (2015) Análise De Modelos Digitais de Elevação para Modelagem do Relevo no município de Francisco Beltrão – PR. *Revista de Geografia Acadêmica. Francisco Beltrão*, p. 50-60. https://www.researchgate.net/publication/288903985_ANALISE_DE_MODELOS_DIGITAIS_DE_ELEVACAO_PARA_MODELAGEM_DO_RELEVO_NO_MUNICIPIO_DE_FRANCISCO_BELTRAO_-_PR.
- Matsumoto, P. S. S., & Flores, E. F. (2012). Estatística espacial na geografia: um estudo dos acidentes de trânsito em presidente prudente – SP. *Geotas Revista Geografia em Atos*, Presidente Prudente, 1(12), 95-105. <https://revista.fct.unesp.br/index.php/geografiaematos/article/view/1755/matsumoto>.
- Melgaço, L. M., Souza Filho, C. R., & Steinmayer, M. (2005). *Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 12. Uberaba*. Comparação entre modelos digitais de elevação gerados por sensores ópticos e por radar. Goiania. INPE, 2005. 6 p. <http://marte.sid.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.23.00.56/doc/1215.pdf>.
- Mendonça Júnior, M. G., & Issmael, L. S. (2020). Mito: Precisão e exatidão são sinônimos. x Fato. É importante entender os significados dos termos que relacionam os conceitos físicos e estatísticos com a mensuração em geoinformação. In: *Luiz Ugeda (São Paulo). Ordem dos Advogados do Brasil. Geodireito - Mitos e Fatos. São Paulo*. Instituto Geodireito. p. 1-134.
- Meena, S. R., & Nachappa, T. G. (2019) Impact of spatial resolution of digital elevation model on landslide susceptibility mapping: A case study in Kullu Valley, Himalayas, *Geosciences*, 9 (8), 10.3390/geosciences9080360.
- Miliareis, G. C. (2008). The Landcover Impact on the Aspect/Slope Accuracy Dependence of the SRTM-1 Elevation Data for the Humboldt Range. *Sensors. Rion*, p. 3134-3149. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27879870/>.
- Mouratidis, A., & Ampatzidis, D. (2019). European Digital Elevation Model Validation against Extensive Global Navigation Satellite Systems Data and Comparison with SRTM DEM and ASTER GDEM in Central Macedonia (Greece). *International Journal of Geo-Information (ISPRS). Aristotle*, p. 1-18 <https://www.mdpi.com/2220-9964/8/3/108>.
- Olaya, F. V. (2004). *Hidrología Computacional y Modelos Digitales del Terreno*. Teoria-practica-y-filosofia-de-una-nueva-forma-de-analisis-hidrologico 1 v.
- Oliveira, C. G., & Paradella, W. (2008). An Assessment of the Altimetric Information Derived from Spaceborne SAR (RADARSAT-1, SRTM3) and Optical (ASTER) Data for Cartographic Application in the Amazon Region. *Sensors*, 8(6), 3819-3829. <http://dx.doi.org/10.3390/s8063819>.
- Oliveira, C. H. (1996). *Planejamento ambiental na cidade de São Carlos (SP) com ênfase nas áreas públicas e áreas verdes: diagnóstico e proposta* Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, pp.22.
- Oliveira, P. T. S. (2010). Caracterização morfométrica de bacias hidrográficas através de dados SRTM. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Campina Grande*. 819 à 825. http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010000800005
- Paradella, W. R., Mura, J. C., & Gama, F. F. (2021). *Monitoramento DInSAR para mineração e geotecnica*. Ed. Oficina dos Textos. 160 p.
- Pompermayr, R., C. (2013). *Modelagem hidrológica técnicas de geoprocessamento aplicadas ao modelo SCS – Soil Conservation Service – Curve Number*. 95 f. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/IGCM-9QEM87>
- Solberg, S., Astrup, R., & Weydahl, D. (2013). Detection of Forest Clear-Cuts with Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and Tandem-X InSAR Data. *Remote Sensing*, 5(11), 5449-5462. <https://www.mdpi.com/2072-4292/5/11/5449>.
- Trevisan, D. P., & Moschini, L. E. (2016). Determinação da fragilidade ambiental do município de São Carlos, São Paulo, Brasil. *Geografia Ensino & Pesquisa*, [S.L.], 20(3), 159-167. Universidad Federal de Santa Maria. https://www.researchgate.net/publication/312070404_Determination_of_areas_with_environmental_fragility_of_the_city_Sao_Carlos_Sao_Paulo_Brazil.
- Ye, X., Guo, Q., Zhang, Z., & Xu, C. (2019). Assessing Hydrological and Sedimentation Effects from Bottom Topography Change in a Complex River–Lake System of Poyang Lake, China. *Water*, 11(7), 1489-1502. <http://dx.doi.org/10.3390/w11071489>. <https://www.mdpi.com/2073-4441/11/7/1489/htm>.
- Yogi, F. (2018). *Parâmetros de estudo em vazão de projeto para renovação de outorga de barramento*. 120 f. Universidade Federal de São Carlos. Sorocaba.