

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS

**MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO DE SENSORES
ORBITAIS PARA ANÁLISE DO TERRENO**

MATHEUS SCHIAVONI DOS SANTOS

DOURADOS

MATO GROSSO DO SUL

2024

**MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO DE SENSORES ORBITAIS
PARA ANÁLISE DO TERRENO**

MATHEUS SCHIAVONI DOS SANTOS

Orientador: Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Universidade Federal da
Grande Dourados, como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Agrícola.

Dourados

Mato Grosso do Sul

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

S237m Santos, Matheus Schiavoni Dos
MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO DE SENSORES ORBITAIS PARA ANÁLISE DO
TERRENO [recurso eletrônico] / Matheus Schiavoni Dos Santos. -- 2024.

Arquivo em formato pdf.

Orientador: Jorge Wilson Cortez.

TCC (Graduação em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2024.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:

<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. altitude. 2. declividade. 3. topografia. I. Cortez, Jorge Wilson. II. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

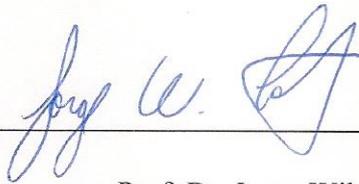
©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

**MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO DE SENSORES ORBITAIS PARA ANÁLISE
DO TERRENO**

Matheus Schiavoni Dos Santos

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como
parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de ENGENHEIRO AGRÍCOLA

Aprovado em: 01 de novembro de 2024



Prof. Dr. Jorge Wilson Cortez
Orientador – UFGD/FCA



Profa. Dra. Anamari Viegas de Araújo Motomiya
UFGD/FCA



Prof. Dr. Eber Augusto Ferreira do Prado
IFMS – Ponta Porã

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Primeiramente, agradeço ao meu orientador, Jorge Wilson Cortez, pela orientação, paciência e apoio durante todo o processo de pesquisa. Suas valiosas sugestões e críticas foram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto.

Agradeço também aos professores do curso de Engenharia Agrícola, cujas aulas e conhecimentos me inspiraram e ajudaram a formar a base teórica necessária para a execução deste trabalho.

Aos meus colegas, agradeço pela troca de ideias e pelo apoio mútuo, que tornaram essa jornada acadêmica mais enriquecedora e divertida. Vocês tornaram os momentos de estudo e troca de experiências inesquecíveis.

A minha família merece um agradecimento especial, pelo amor e incentivo constantes. Sua compreensão e apoio incondicional foram essenciais para que eu pudesse dedicar-me a este trabalho.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste projeto, seja com apoio emocional, sugestões ou até mesmo palavras de encorajamento. Sem vocês, este trabalho não teria sido possível.

Muito obrigado!

SANTOS, M. S. **Modelos digitais de elevação de sensores orbitais para análise do terreno**. 2024. 30f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso), Bacharelado em Engenharia Agrícola – Faculdade de Ciências Agrárias, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados, 2024.

RESUMO

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) gerados a partir de sensores orbitais desempenham um papel fundamental na análise do terreno, permitindo a coleta de informações precisas sobre a topografia da superfície terrestre. Entre os principais satélites que contribuem para a criação desses modelos, destacam-se o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), o satélite da missão Copernicus e o NASADEM (*NASA Digital Elevation Model*). Portanto, o objetivo foi estudar modelos digitais de elevação de sensores orbitais para análise do terreno com imagens obtidas dos projetos SRTM, Alos Palsar, Copernicus e Nasadem para obter informações topográficas do estado do Mato Grosso do Sul. A área de estudo foi o Estado de Mato Grosso do Sul, que está na região Centro-Oeste do Brasil. As imagens de radar foram obtidas a partir do plugin “*OpenTopography DEM Downloader*” no software QGIS (2022) com dados dos projetos: SRTM; Alos World; Copernicus Global DSM; Nasadem Global DEM. As imagens foram baixadas a partir das quatro mesorregiões do estado do MS que são: Pantanal, Centro Norte, Leste e Sudoeste. Assim, foram baixadas quatro imagens de cada projeto. A partir do processamento das imagens foi obtido o mapa de altimetria, declividade e do índice de rugosidade do terreno. Os dados foram submetidos a estatística descritiva. Com os mapas reclassificados foi realizado o cálculo do índice *Kappa* para fazer a comparação entre os dados de cada radar. Os dados de altimetria dos projetos SRTM, Alos, Copernicus e Nasadem apresentam valores de kappa e exatidão global próximos, indicando que podem ser utilizados sem distinção entre os mapas. Os modelos digitais de elevação dos projetos SRTM e Nasadem são muito similares e apresentam maior exatidão global no cálculo de declividade e índice de rugosidade do terreno.

Palavras-chave: altitude, declividade, topografia.

SANTOS, M. S. **Digital elevation models from orbital sensors for terrain analysis**. 2024. 30f. Bachelor's Course Completion Work in Agricultural Engineering – Faculty of Agricultural Sciences, Federal University of Grande Dourados, Dourados, 2024.

ABSTRACT

Digital Elevation Models (DEMs) generated from orbital sensors play a fundamental role in terrain analysis, allowing precise information to be collected on the topography of the earth's surface. The main satellites that contribute to the creation of these models include SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), the Copernicus mission satellites and NASADEM (*NASA Digital Elevation Model*). Therefore, the objective was to study digital elevation models from orbital sensors for terrain analysis with images obtained from the SRTM, Alos Palsar, Copernicus and Nasadem projects in order to obtain topographic information for the state of Mato Grosso do Sul. The study area was the state of Mato Grosso do Sul, which is in the Center-West region of Brazil. The radar images were obtained from the “OpenTopography DEM Downloader” plugin in the QGIS software (2022) with data from the projects: SRTM; Alos World; Copernicus Global DSM; Nasadem Global DEM. The images were downloaded from the four mesoregions of the state of Mato Grosso do Sul, which are: Pantanal, Center North, East and Southwest. Thus, four images were downloaded from each project. After processing the images, the altimetry, slope and terrain roughness index maps were obtained. The data was subjected to descriptive statistics. With the maps reclassified, the Kappa index was calculated to compare the data from each radar. The altimetry data from the SRTM, Alos, Copernicus and Nasadem projects show close kappa and global accuracy values, indicating that they can be used without distinguishing between the maps. The digital elevation models from the SRTM and Nasadem projects are very similar and show greater overall accuracy when calculating slope and terrain roughness index.

Keywords: elevation, slope, topography.

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| RESUMO | 6 |
| ABSTRACT | 7 |
| 1 INTRODUÇÃO | 9 |
| 2 REVISÃO DE LITERATURA | 10 |
| 2.1 Sensoriamento remoto e geoprocessamento | 10 |
| 2.2 Modelos digitais de elevação | 11 |
| 2.3 Índice de rugosidade do terreno | 13 |
| 3 MATERIAIS E MÉTODOS | 14 |
| 3.1 Localização e histórico da área | 14 |
| 3.2 Coleta de Imagens | 14 |
| 3.3 Fluxograma de trabalho | 15 |
| 3.4 Análise dos dados | 16 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 17 |
| 4.1 Análise da altimetria | 17 |
| 4.2 Análise da declividade | 20 |
| 4.3 Análise do índice de rugosidade do terreno | 22 |
| 4.4 Índice Kappa | 24 |
| 5 CONCLUSÃO | 26 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 27 |

1 INTRODUÇÃO

O relevo do Mato Grosso do Sul é formado principalmente por planícies (JUNIOR, 2016). O estado é formado por diversos tipos de ambientes, que vão desde planaltos compostos principalmente por formações de grande altitude até planícies úmidas, consideradas a maior área de várzea do país. Estudar os relevos é muito importante para entender quais são os locais favoráveis à construção de casas, prédios, estradas, plantações, pastagens e muitas outras situações. Os dados obtidos do sensoriamento remoto são uma das bases de análise para subsidiar os processos de planejamento e gestão.

O processo de identificação e caracterização da topografia é realizado através da medição de diversos parâmetros, como direção de declividade, altitude, rede hidrológica, etc. Quando combinados com modelos topográficos, resulta em um produto final denominado topografia (VALERIANO, 2004).

A melhor forma de representação da superfície é por meio do MDE – Modelo Digital de Elevação. O MDE é uma base de informações que apresenta os valores de altitude do solo em um conjunto de números coordenados que variam em diversos aspectos, como a distribuição espacial dos dados e a resolução da área que será mostrada em um pixel (MACEDO e SURYA, 2018).

Por conta disso, os processos de automação e sistematização de dados tornam-se uma alternativa para a elaboração e desenvolvimento dessas informações, em especial, o uso de geoprocessamento e imagens de satélite vêm demonstrando ter enorme capacidade de substituir os métodos tradicionais, trazendo alto grau de confiabilidade nos resultados e otimização dos custos (VALERIANO, 2004). O MDE se torna outra vantagem, pois, não é preciso fazer grandes gastos em hardware e software, devido à variedade de ferramentas de código aberto, como o QGIS (MACEDO e SURYA, 2018).

Portanto, o objetivo foi estudar modelos digitais de elevação de sensores orbitais para análise do terreno com imagens obtidas dos projetos SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), Alos Palsar, Copernicus e Nasadem para obter informações topográficas do estado do Mato Grosso do Sul.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Sensoriamento remoto e geoprocessamento

O sensoriamento remoto e o geoprocessamento são áreas interligadas que têm revolucionado a forma como analisamos e interpretamos dados geoespaciais. O sensoriamento remoto envolve a coleta de informações sobre a superfície da Terra por meio de dispositivos que captam ondas eletromagnéticas, enquanto o geoprocessamento refere-se ao conjunto de técnicas e ferramentas utilizadas para analisar, interpretar e visualizar esses dados.

O sensoriamento remoto é definido como a técnica de aquisição de informações sobre objetos ou áreas à distância, utilizando sensores instalados em plataformas aéreas ou espaciais. Conforme afirmado por Lillesand et al. (2015), “o sensoriamento remoto é uma ferramenta vital na coleta de dados geográficos, permitindo o monitoramento de fenômenos naturais e antropogênicos em grande escala”. Essa técnica é amplamente utilizada em diversas aplicações, incluindo agricultura, silvicultura, gestão de recursos hídricos, planejamento urbano e monitoramento ambiental.

Os satélites de observação da Terra, como os da série Landsat e Sentinel, têm sido fundamentais para a aquisição de dados em diferentes resoluções espaciais e temporais. Bastin et al. (2019) destacam que “a combinação de dados de diferentes satélites permite análises mais robustas, especialmente em contextos de mudança climática e degradação ambiental”.

Burrough e McDonnell (1998) definem o geoprocessamento como “todas as operações que podem ser realizadas em dados geográficos, incluindo coleta, análise e visualização”. Essas operações são essenciais para a integração de dados provenientes de diferentes fontes, permitindo a realização de análises espaciais complexas.

A utilização de sistemas de informação geográfica (SIG) é uma das aplicações mais comuns do geoprocessamento. Longley et al. (2015) afirmam que “os SIGs são plataformas poderosas para a visualização e análise de dados espaciais, facilitando a tomada de decisões em várias áreas, como gestão ambiental e urbanismo”. A capacidade de sobrepor diferentes camadas de informação, como uso do solo, infraestrutura e dados demográficos, é crucial para uma análise holística das questões territoriais.

A integração entre sensoriamento remoto e geoprocessamento potencializa a análise de dados geoespaciais, permitindo uma compreensão mais abrangente dos fenômenos naturais e sociais. Jensen (2007) afirma que “a combinação dessas duas áreas possibilita não apenas a visualização de dados, mas também a modelagem e a previsão de tendências futuras”.

Um exemplo prático dessa integração é o monitoramento de desmatamento, onde dados de sensoriamento remoto são utilizados para identificar áreas desmatadas, enquanto o geoprocessamento é empregado para analisar a fragmentação do habitat e suas consequências para a biodiversidade (HANSEN et al., 2013). Essa abordagem integrada é fundamental para a gestão sustentável dos recursos naturais e para a formulação de políticas públicas eficazes.

Em suma, o sensoriamento remoto e o geoprocessamento são ferramentas complementares que têm um papel fundamental na análise geoespacial contemporâneas. A capacidade de coletar, processar e analisar dados geográficos permite uma melhor compreensão dos complexos sistemas naturais e sociais, contribuindo para o desenvolvimento sustentável e a conservação ambiental.

2.2 Modelos digitais de elevação

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) são representações digitais da superfície terrestre, que capturam variações na altimetria e na configuração do terreno. Esses modelos são gerados a partir de dados topográficos coletados por meio de diversas tecnologias, como sensoriamento remoto, levantamentos aéreos, fotogrametria e dados de campo. Os MDEs são amplamente utilizados em diversas áreas, incluindo planejamento urbano, gestão ambiental, engenharia civil e ciências da terra.

Os componentes dos Modelos Digitais de Elevação são:

- **Altitude:** A elevação de um ponto em relação ao nível do mar. A análise da altitude é crucial para identificar características geográficas, como montanhas, vales e planícies. Segundo Lillesand et al. (2015), “a altitude é uma das principais variáveis que influenciam a biodiversidade e a distribuição de espécies em um ecossistema”. Em projetos de planejamento urbano, a altitude ajuda a determinar áreas propensas a inundações e que podem ser mais adequadas para construção.
- **Declividade:** Refere-se à inclinação do terreno, que é calculada a partir das diferenças de altitude entre pontos adjacentes. A declividade é vital para entender o escoamento da água e a erosão do solo. Moore et al. (1991) afirmam que “a declividade é um parâmetro chave na modelagem de processos hidrológicos e na avaliação da estabilidade do solo”. Em projetos agrícolas, por exemplo, a análise da declividade pode auxiliar na escolha de práticas de cultivo adequadas e na gestão de irrigação.

- **Rugosidade:** Representa a variabilidade da superfície do terreno, incluindo relevo e depressões. A rugosidade afeta a infiltração de água e a dinâmica dos ecossistemas. Mitas e Mitasova e (1999) destacam que “a rugosidade do terreno tem um impacto direto nos padrões de escoamento e na biodiversidade”. Projetos de conservação ambiental frequentemente utilizam a análise de rugosidade para identificar habitats críticos e priorizar áreas para restauração.

Os mapas de declividade, originados dos mapas de altimetria, expressam a forma do relevo de uma região, determinando a inclinação das vertentes, que junto ao MDE, fornecem ao poder público possibilidade de analisar o uso e planejar sua ocupação (MARQUES LEAL et al., 2019).

Os modelos digitais de elevação foram obtidos de diversas missões espaciais dentre as quais podemos destacar: o SRTM, ALOS e COPERNICUS.

O projeto SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission* do USGS - *United States Geological Survey* (SRTM, 2024) consistiu de um radar que voou a bordo do Ônibus Espacial Endeavour durante uma missão de 11 dias em fevereiro de 2000, sendo um projeto liderado pelo *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) e pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). O sensor da missão SRTM é o que tem sido mais confiáveis na disponibilização de suas imagens para análise digital do terreno (MACEDO e SURYA, 2018). Além disso, foi o primeiro e mais completo mapeamento terrestre feito (FARR et al., 2007).

O conjunto de dados de radar denominados como ALOS é originário da *Japan Aerospace Exploration Agency* – também conhecida como JAXA (ALOS, 2024). O sensor Palsar está a bordo do satélite Alos (*Advanced Land Observing Satellite*) (MACEDO e SURYA, 2018). Este fornece um conjunto de dados do modelo de superfície digital global (DSM) com uma resolução horizontal de aproximadamente 30 m de maneira gratuita. A coleta de imagens foi usando o *Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping* (PRISM) a bordo do *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS) de 2006 a 2011 2006 (ALOS, 2024).

O produto originário do Copernicus DEM é um Modelo Digital de Superfície (DSM). Os dados de radar são originários da missão TanDEM-X entre 2011 e 2015 (COPERNICUS, 2024)

Os produtos do NASADEM (NASA, 2021) são produtos originados do programa SRTM que passaram por reprocessamento que permitiu a minimização de vazios, estendeu a

cobertura espacial melhorou ajustes verticais e de inclinação, sendo os produtos disponíveis gratuitamente por meio do *Land Processes Distributed Active Archive Center -LP DAAC* (NASADEM, 2024)

2.3 Índice de rugosidade do terreno

O índice de rugosidade do terreno - TRI foi proposto por Riley et al. (1999) que analisa a diferença de elevação em uma matriz de pontos em relação ao ponto central. Segundo Gomes (2018), o mapa de rugosidade se relaciona com a heterogeneidade do terreno. O índice de rugosidade é uma medida que quantifica a variabilidade e a complexidade da superfície de um terreno. É utilizado para descrever como a topografia de uma área influencia processos hidrológicos, a infiltração de água, a erosão do solo e a biodiversidade. O índice é especialmente relevante em estudos ambientais, agrícolas e de planejamento territorial. O cálculo do índice de rugosidade pode ser feito utilizando os dados de Modelos Digitais de Elevação (MDE), onde a rugosidade é derivada da variação da elevação em relação à média local. Fórmulas matemáticas podem incluir a soma das diferenças de elevação entre células adjacentes, permitindo quantificar a irregularidade da superfície.

O TRI possibilita a avaliação objetiva da diversidade do terreno, caracterizada pela variação média de altitude entre o pixel central e os oito pixels ao redor (CARDOSO, 2014).

De acordo com Bertol et al. (2006), a rugosidade refere-se à disposição espacial das elevações e depressões do terreno, ou seja, às mudanças de altitude nas micro elevações e de profundidade nas micro depressões da superfície.

Outra aplicação do TRI é para identificar áreas com possibilidade de Erosividade hídrica (ANJOS et al., 2021).

Salgado et al. (2011), utilizando o TRI para análise de áreas propensas a erosão, verificaram que a observação da disposição geográfica dos valores de TRI revelou regiões com encostas íngremes acima da bacia hidrográfica, planaltos acima dessas encostas, superfícies mais suaves abaixo das encostas íngremes e superfícies acidentadas abaixo dos reservatórios.

Mitas e Mitsova (1999) afirmam que "a rugosidade do terreno afeta diretamente os padrões de escoamento e a distribuição da vegetação". Isso destaca a importância de compreender como a rugosidade influencia a dinâmica ambiental.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Localização e histórico da área

A área de estudo foi o Estado de Mato Grosso do Sul, que está na região Centro-Oeste do Brasil (Figura 1).

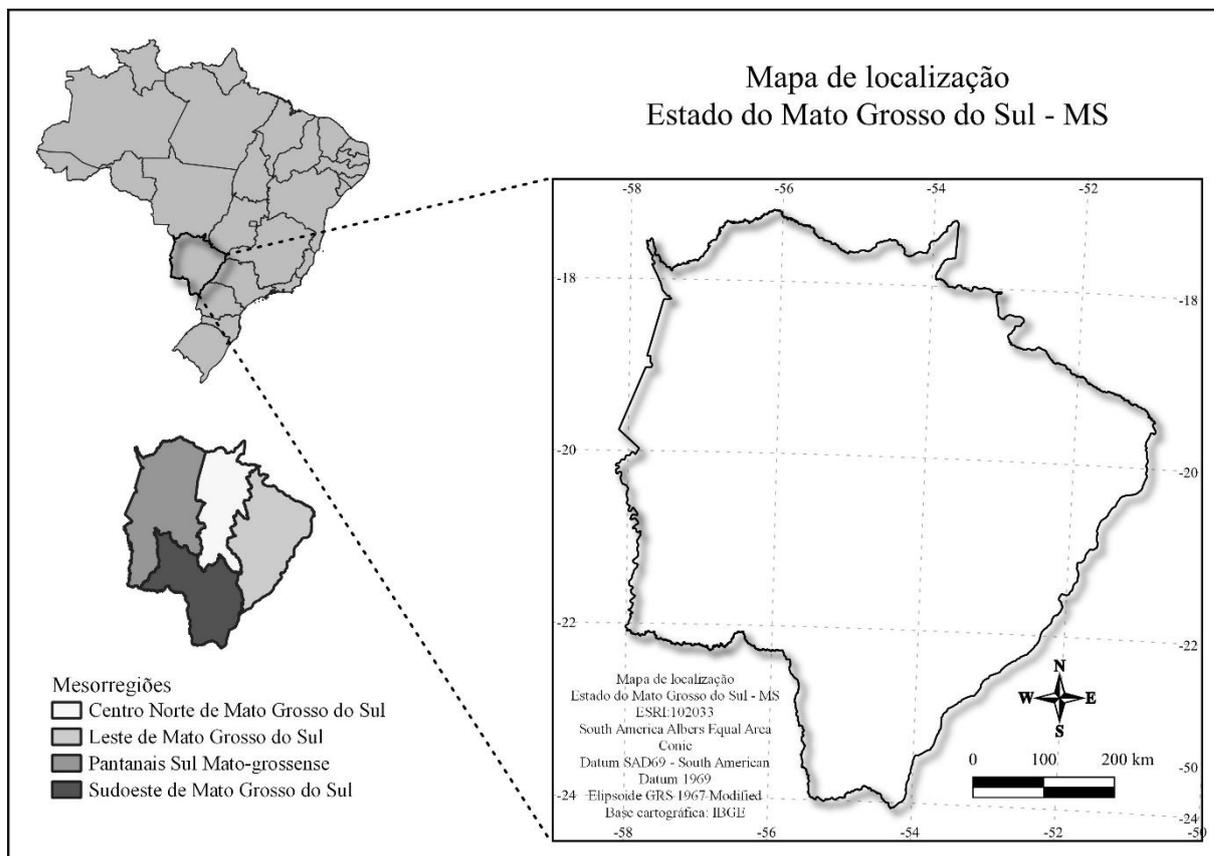


FIGURA 1. Mapa de localização do estado do Mato Grosso do Sul.

3.2 Coleta de Imagens

As imagens de radar foram obtidas a partir do plugin “*OpenTopography DEM Downloader*” (McMAHON, 2022) no software QGIS (2022) com dados dos projetos:

- SRTM;
- Alos World;
- Copernicus Global DSM;
- Nasadem Global DEM.

As imagens foram baixadas a partir das quatro mesorregiões do estado do MS que são (Tabela 1): Pantanal, Centro Norte, Leste e Sudoeste. Assim, foram baixadas quatro imagens de cada projeto.

TABELA 1. Dados das imagens de radar.

| Fontes de dados | SRC | Coordenadas | Tipo | Resolução espacial (m) |
|-----------------|---------------|-------------|---------|------------------------|
| Projetos | 4326 - WGS 84 | Geográfico | GeoTIFF | 27,77 |

SRC: sistema de referência de coordenadas. WGS: *world geodetic system*.

3.3 Fluxograma de trabalho

Os dados obtidos do IBGE foram o limite do município e demais bases cartográficas, como também os dados do mapa de solos (IBGE, 2001).

A partir do complemento disponível gratuitamente para uso no QGIS, o *OpenTopography* DEM (McMAHON, 2022), foi possível baixar as imagens das mesorregiões.

Com as camadas adicionadas ao QGIS (QGIS.org, 2023), iniciou-se o processo com a mesclagem (Raster – Miscelânea – Mesclar) das imagens para uma única camada. Depois as imagens foram reprojetaadas para o sistema de projeção ESRI:102033, *South America Albers Equal Area Conic*, com Datum SAD69 - *South American Datum 1969*, com elipsoide GRS 1967 *Modified*,

O limite do município também foi reprojetaado para ESRI:102033 para ser feito o recorte das imagens para os limites do MS (Raster – Extrair – Recortar raster pela camada de máscara). Os mapas de altitude foram reclassificados com o comando “Reclassificar por tabela” com base nas classes da Tabela 2.

Nos mapas de altimetria e declividade foram aplicados a simbologia utilizando o padrão de cores da Tabela 2.

TABELA 2. Classes e número hexacode utilizados.

| Cor | Classe altimetria (m) | Classes declividade (SANTOS et al., 2018) | Número hexacode |
|---|-----------------------|---|-----------------|
|  | <50 | Plano 0 a 3% | #30b000 |
|  | 50-150 | Suave ondulado 3 a 8% | #a5ff00 |
|  | 150-300 | Ondulado 8 a 20% | #ffff63 |
|  | 300-450 | Forte ondulado 20 a 45% | #fea700 |
|  | 450-750 | Montanhoso 45 a 75% | #ff4c00 |
|  | >750 | Escarpado >75% | #b40000 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

Depois, foi realizado o cálculo de declividade expresso em porcentagem com o comando “Declive” do GDAL do QGIS. Os mapas de declividade foram reclassificados (SANTOS et al., 2018) com o comando “Reclassificar por tabela”.

O índice de rugosidade TRI proposto por Riley et al., (1999) foi calculado pelo comando “Índice de Rugosidade” no QGIS. Os mapas de TRI foram reclassificados (SILVA e MUTRE, 2018) sendo: 1) TRI < 1,9: Terreno plano; 2) TRI 1,91 a 3,9: Terreno quase plano; 3) TRI 3,91 a 5,9: Rugosidade baixa; 4) TRI 5,91 a 8,4: Rugosidade intermediária; 5) TRI 8,41 a 11,4: Rugosidade moderada; 6) TRI 11,41 a 15,6: Rugosidade elevada; 7) TRI 15,61 a 36,9: Rugosidade extrema, com o comando “Reclassificar por tabela”.

Posteriormente foi aplicado o comando “*r.report*” nos mapas reclassificados que calcula a área de cada classe de altitude e declividade em hectares (ha).

O resumo das fases de trabalho está descrito no fluxograma da Figura 2.

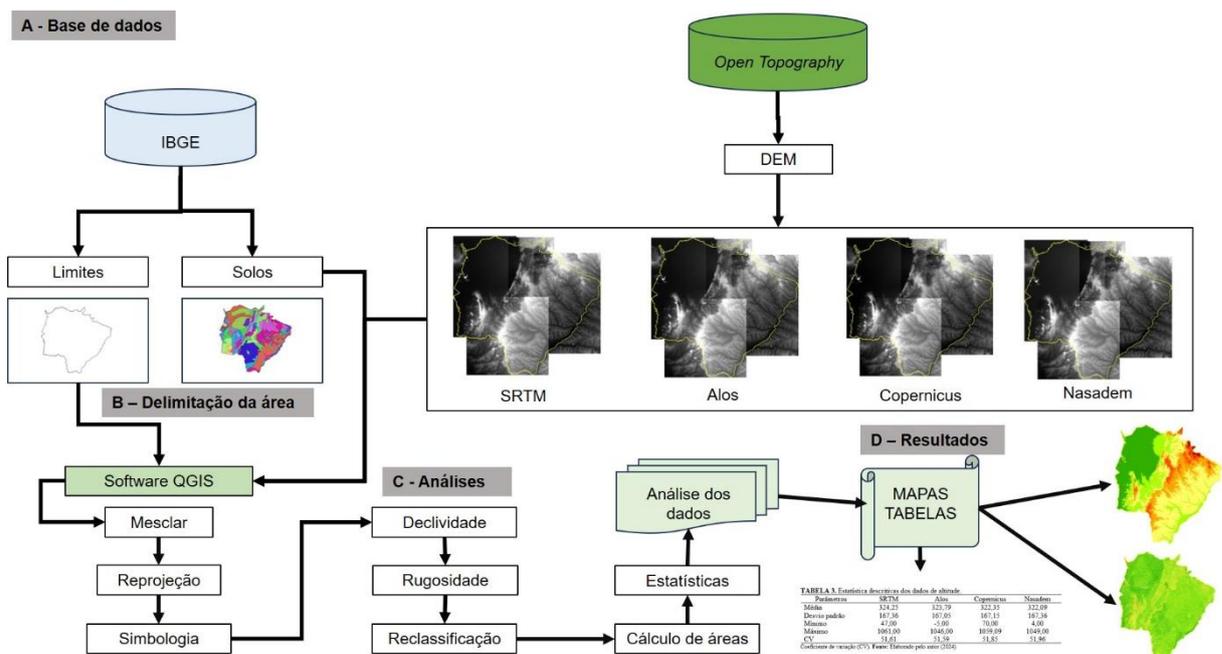


FIGURA 2. Representação do fluxograma de trabalho. **Fonte:** Elaborado pelo autor (2024)

3.4 Análise dos dados

Os dados descritivos foram obtidos da ferramenta “Estatística da camada raster” no QGIS. A distribuição de frequência foi obtida do produto “Histograma” do QGIS.

Com os mapas reclassificados foi realizado o cálculo do índice *Kappa* (comando “*r.kappa*”) conforme Cohen (1960) para fazer a comparação entre os dados de cada radar.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise da altimetria

Os dados do modelo digital de elevação - MDE (Tabela 3) indicam diferenças suaves entre os sensores. Essas pequenas diferenças podem ser confirmadas pela proximidade do desvio padrão e do coeficiente de variação (CV). Diferenças entre os sensores são observados junto aos valores de mínimo e máximo, em que o Alos foi o único que indicou valores negativos, e o maior valor de elevação foi verificado para o SRTM, mas com pequenas diferenças dos demais.

TABELA 3. Estatística descritivas dos dados de altitude.

| Parâmetros | SRTM | Alos | Copernicus | Nasadem |
|---------------|---------|---------|------------|---------|
| Média | 324,25 | 323,79 | 322,35 | 322,09 |
| Desvio padrão | 167,36 | 167,05 | 167,15 | 167,36 |
| Mínimo | 47,00 | -5,00 | 70,00 | 4,00 |
| Máximo | 1061,00 | 1046,00 | 1059,09 | 1049,00 |
| CV | 51,61 | 51,59 | 51,85 | 51,96 |

Coeficiente de variação (CV). **Fonte:** Elaborado pelo autor (2024)

A variação dos valores de elevação também pode ser vista nos histogramas de frequência (Figura 3). Veja que as curvas de distribuição dos valores são similares para SRTM e Nasadem e diferem do Alos e Copernicus, principalmente na região de menor valores de elevação. Sendo que essa diferença nos valores mais baixos de elevação é mais visível no Alos. Hengl (2006) explica que com baixa resolução algumas elevações podem desaparecer. Na Figura 3, ainda pode-se perceber a concentração dos valores em torno de 100 m de elevação e depois em torno de 400 m de elevação.

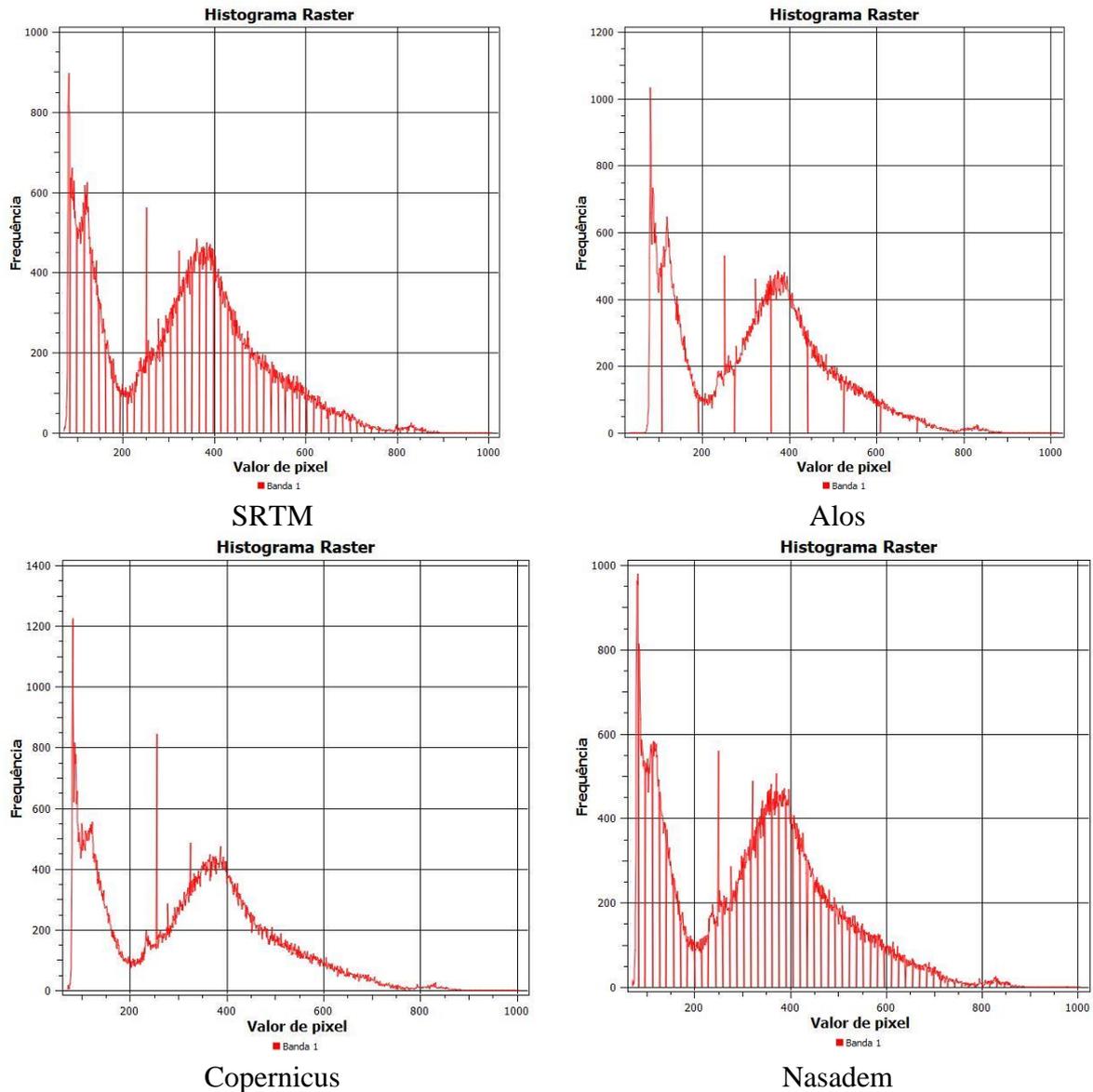


FIGURA 3. Distribuição de frequência elevação no estado do Mato Grosso do Sul.

A distribuição da elevação (Figura 3) pelos quatro projetos não apresentam distinção visual. Fato também observado por Macedo e Surya, (2018) ao comparar dados do Alos e SRTM, somente com a aproximação à uma área de interesse que era possível perceber diferenças, sendo que o mesmo utilizou de imagens de 12,5 e 30 m de pixel, respectivamente.

Os dados da distribuição da altimetria do MS (Figura 4) para os projetos SRTM, Nasadem, Alos e Copernicus não apresentam distinção visual. Fato que pode estar associado ao uso da imagem com mesmo tamanho de pixel (resolução espacial).

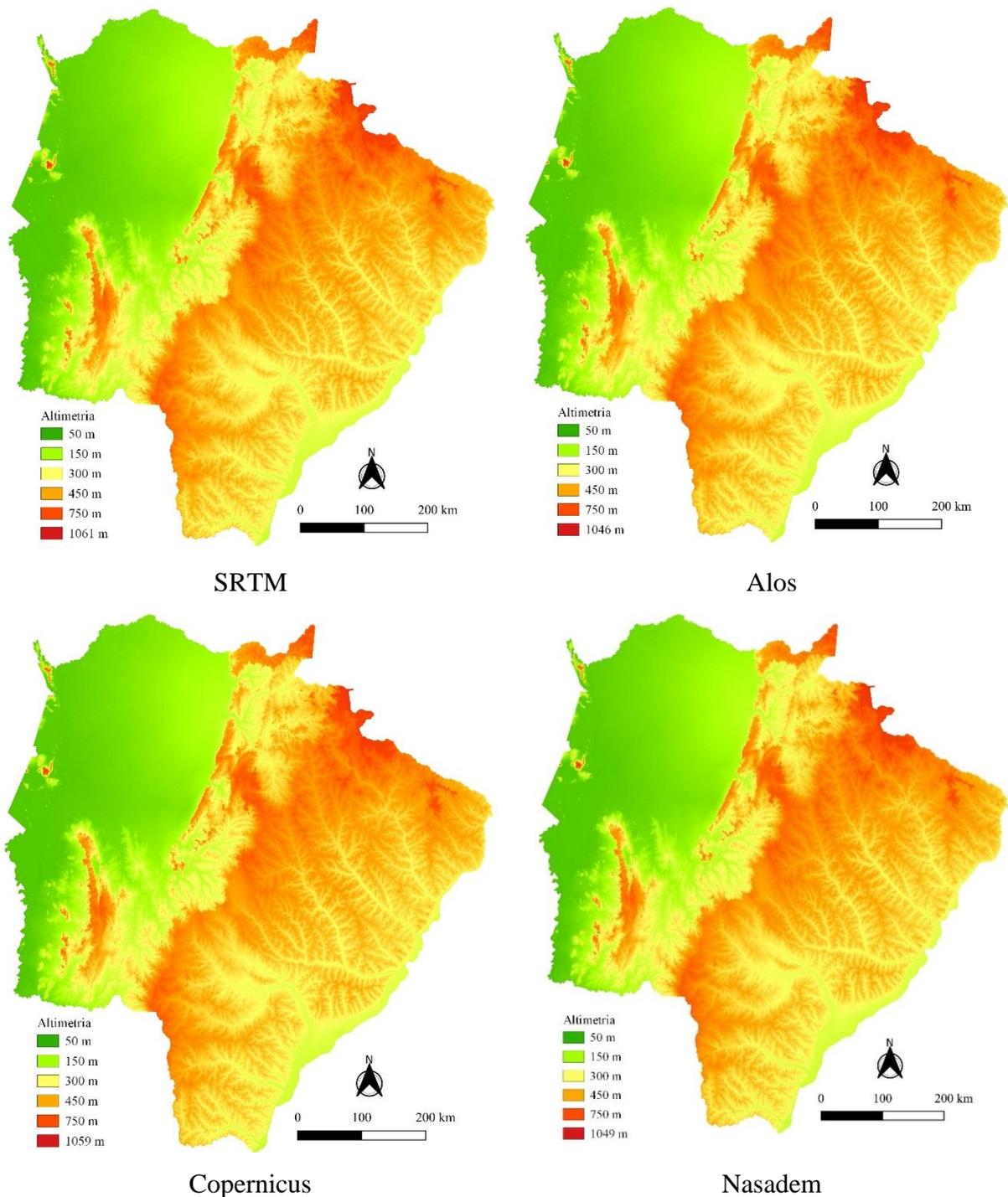


FIGURA 4. Representação espacial da elevação no estado do Mato Grosso do Sul.

Os dados da distribuição da área e porcentagem nas classes de altimetria do MS (Tabela 4) para os projetos SRTM, Nasadem, Alos e Copernicus indicam algumas diferenças entre os projetos. As diferenças evidentes estão nos valores mínimos para o Copernicus, que não teve nenhuma área abaixo de 50 m. Esse resultado também é próximo do Nasadem que teve apenas 3,0 ha na classe abaixo de 50 m. Para as demais classes de declividade verifica-se similaridade entre as áreas e porcentagem para todos os sensores.

TABELA 4. Classes de altitude com área e porcentagem.

| Classes | SRTM | Alos | Copernicus | Nasadem |
|-----------------|----------|----------|------------|----------|
| Área (ha) | | | | |
| <50 | 78 | 78 | 0 | 3 |
| 50-150 | 8745038 | 8745038 | 8867227 | 8909639 |
| 150-300 | 6167713 | 6167713 | 6064877 | 6080585 |
| 300-450 | 13161813 | 13161813 | 13199150 | 13170585 |
| 450-750 | 7366293 | 7366293 | 7314528 | 7285444 |
| >750 | 273495 | 273495 | 268651 | 268181 |
| Porcentagem (%) | | | | |
| <50 | 0,22 | 0,22 | 0,00 | 0,01 |
| 50-150 | 24,43 | 24,43 | 24,83 | 24,94 |
| 150-300 | 17,23 | 17,23 | 16,98 | 17,02 |
| 300-450 | 36,77 | 36,77 | 36,96 | 36,87 |
| 450-750 | 20,58 | 20,58 | 20,48 | 20,40 |
| >750 | 0,76 | 0,76 | 0,75 | 0,75 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.2 Análise da declividade

A análise da declividade de uma área é importante para ajudar a entender o comportamento do escoamento da água que pode levar a perda de solo, erosão, devido a maior velocidade de escoamento e menor taxa de infiltração (OLIVEIRA et al., 2007).

Os dados de declividade ficaram próximos a 5%, somente o Copernicus que apresentou valor médio de declividade abaixo de 5%. Como o cálculo de declividade é feito pixel a pixel, verifica-se valor elevado do coeficiente de variação.

TABELA 5. Estatísticas descritivas da declividade (%) para diferentes sensores.

| Parâmetros | SRTM | Alos | Copernicus | Nasadem |
|---------------|--------|--------|------------|---------|
| Média | 5,23 | 5,17 | 4,71 | 5,19 |
| Desvio padrão | 5,52 | 6,13 | 6,04 | 5,43 |
| CV | 105,54 | 118,57 | 128,24 | 104,62 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A distribuição de frequência da declividade reclassificada, conforme Santos et al., (2018), nas classes de 1 - Plano 0 a 3%; 2 - Suave ondulado 3 a 8%; 3- Ondulado 8 a 20%; 4 - Forte ondulado 20 a 45%; 5 - Montanhoso 45 a 75% e 6 - Escarpado >75%, indicam maiores valores da classe 1 do Alos e Copernicus. Sendo que no Copernicus a quantidade de pontos na classe 1 foi maior que a classe 2.

Na representação espacial da declividade do MS (Figura 5) é possível identificar visualmente algumas alterações para o Alos e Copernicus na região do Pantanal. A representação espacial do SRTM e Nasadem são muito similares. Essa similaridade é comprovada com os dados de porcentagem de área (Tabela 6) muito próximos do SRTM e Nasadem.

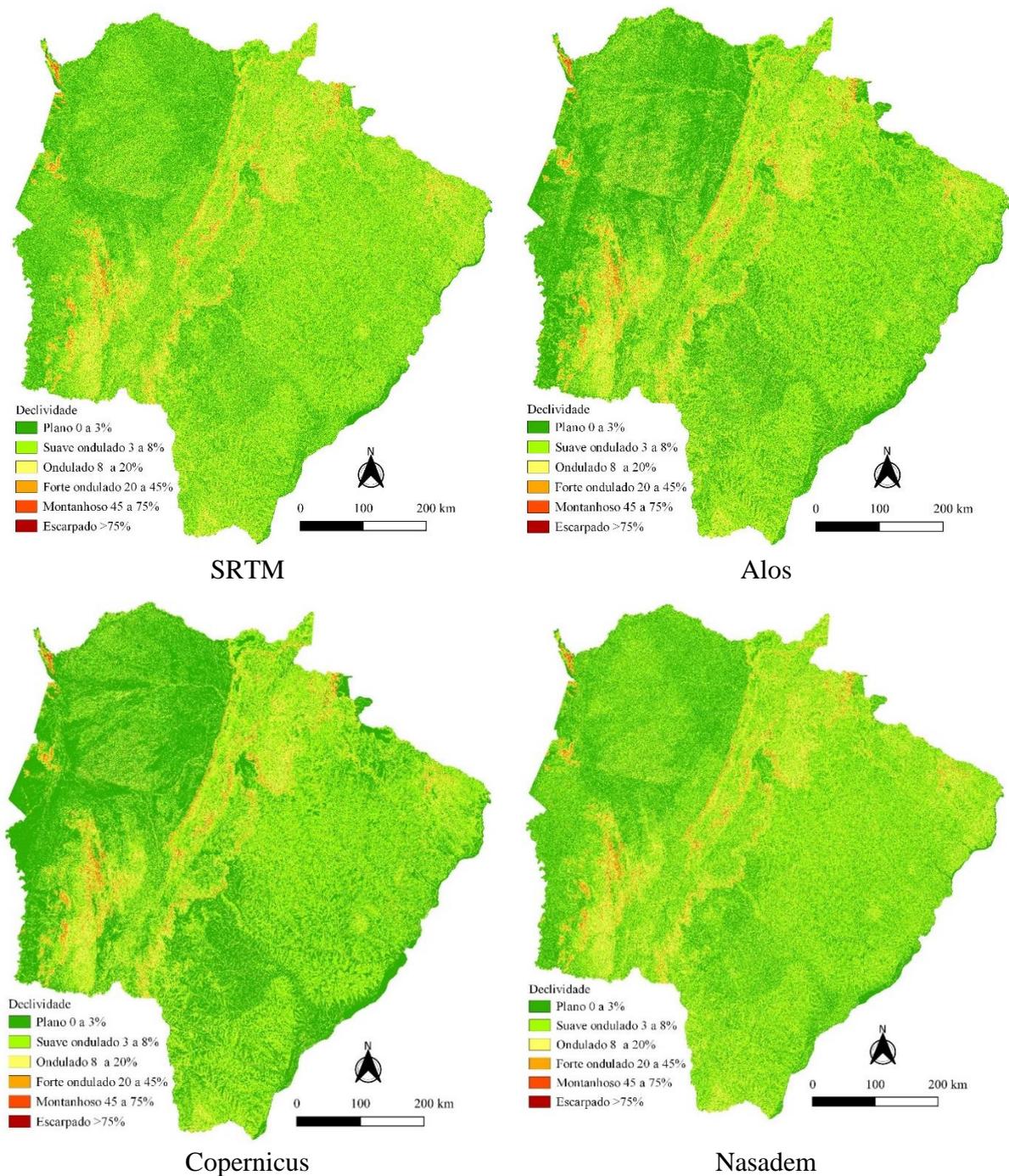


FIGURA 5. Representação espacial da declividade no estado do Mato Grosso do Sul.

A porcentagem de área da declividade do MS (Tabela 6) tem maior variação para o Alos e Copernicus, sendo que no Copernicus a classe 1 (0 a 3%) apresentou a maior proporção em relação aos demais sensores, sendo o único sensor a ter esse comportamento. A classe de 3 a 8% também apresentou variações entre os sensores, tendo similaridade entre o SRTM e Nasadem e diferente entre Alos e Copernicus, tendo a menor quantidade de área para o Copernicus.

TABELA 6. Classes de declividade e porcentagem da área.

| Classes | SRTM | Alos | Copernicus | Nasadem |
|-----------------|-------|-------|------------|---------|
| Porcentagem (%) | | | | |
| 0 a 3% | 34,53 | 40,14 | 46,37 | 34,34 |
| 3 a 8% | 50,48 | 44,56 | 39,76 | 50,91 |
| 8 a 20% | 12,99 | 12,81 | 11,56 | 12,83 |
| 20 a 45% | 1,70 | 2,07 | 1,92 | 1,61 |
| 45 a 75% | 0,27 | 0,37 | 0,35 | 0,27 |
| >75% | 0,03 | 0,05 | 0,04 | 0,03 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

4.3 Análise do índice de rugosidade do terreno

O índice de rugosidade - TRI (Tabela 7) proposto por Riley et al., (1999) foi reclassificado conforme Silva e Mutre, (2018) que dividiu em 7 classes, desde terreno plano até Rugosidade extrema. Os dados de médios de TRI para o MS indicam classe 3, Rugosidade baixa. Os dados provenientes da análise pixel a pixel resultaram em valores elevados de CV, ainda maiores que o da declividade.

TABELA 7. Estatísticas descritivas do índice de rugosidade do terreno (%).

| Parâmetros | SRTM | Alos | Copernicus | Nasadem |
|---------------|--------|--------|------------|---------|
| Média | 5,20 | 5,47 | 4,64 | 5,12 |
| Desvio padrão | 16,34 | 16,54 | 16,45 | 16,25 |
| CV | 314,23 | 302,38 | 354,53 | 317,38 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024)

A representação espacial do índice de rugosidade – TRI (Figura 6) acompanham as diferenças visuais apresentadas na declividade. Em que, é possível identificar visualmente algumas alterações para o Alos e Copernicus na região do Pantanal, como também em algumas regiões mais ao sul do estado.

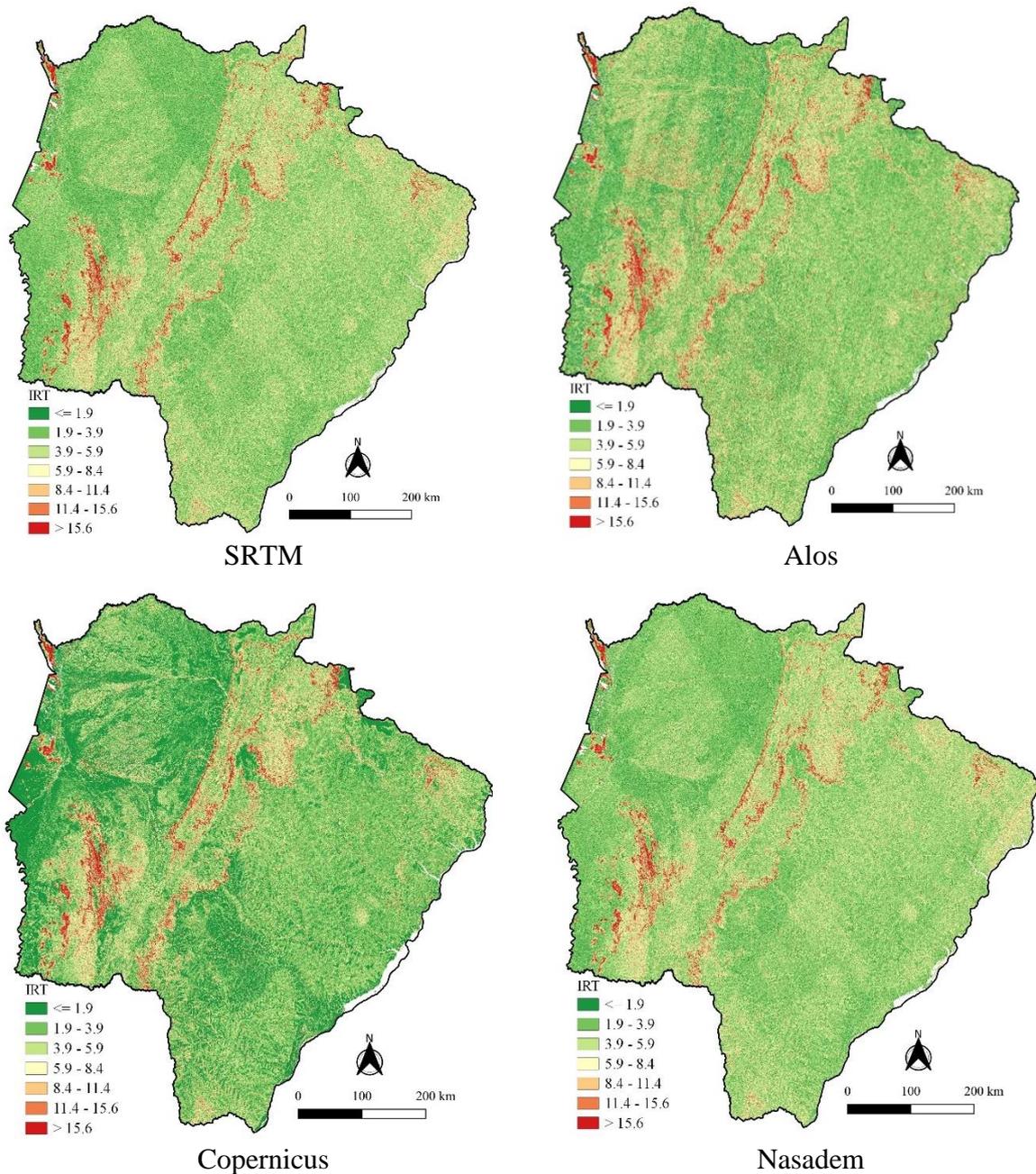


FIGURA 6. Representação espacial da declividade no estado do Mato Grosso do Sul.

Os dados do TRI (Tabela 8) indicam que ocorre no MS maior parte da área nas classes 2 e 3, conforme Silva e Mutre, (2018), que seriam terrenos quase plano e rugosidade baixa, respectivamente. Somente no Copernicus identifica uma área mais acentuada na Classe 1, com terreno plano, o que difere dos demais sensores.

TABELA 8. Classes do índice de rugosidade do terreno (IRT) e porcentagem da área.

| IRT | Classes | SRTM | Alos | Copernicus | Nasadem |
|--------------|--------------------------|-------|-------|------------|---------|
| | | | | | |
| < 1,9 | Terreno plano | 7,12 | 9,48 | 28,64 | 7,18 |
| 1,91 a 3,9 | Terreno quase plano | 43,76 | 42,55 | 34,43 | 43,90 |
| 3,91 a 5,9 | Rugosidade baixa | 27,04 | 23,39 | 16,92 | 27,68 |
| 5,91 a 8,4 | Rugosidade intermediária | 13,01 | 12,29 | 9,51 | 13,15 |
| 8,41 a 11,4 | Rugosidade moderada | 4,76 | 5,81 | 4,99 | 4,28 |
| 11,41 a 15,6 | Rugosidade elevada | 2,07 | 3,25 | 2,70 | 1,72 |
| >15,6 | Rugosidade extrema | 2,24 | 3,24 | 2,82 | 2,10 |

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

4.4 Índice Kappa

Analisando o índice *Kappa* para a altimetria (Tabela 9) observa-se que teve uma classificação quase perfeita para todos os projetos, conforme pode-se interpretado por Landis e Koch (1997) que sugere os valores do coeficiente de Kappa maiores do que 0,80 representam concordância “quase perfeita”; entre 0,60 e 0,80, “substancial”; entre 0,40 e 0,60, “moderada”; e abaixo de 0,40 representam concordância “fraca”.

De acordo com Stehman e Foody (2019), o limite de 85% para a qualidade da classificação não é universalmente válido, apesar de ser amplamente utilizado. Ressaltam que a avaliação da precisão desses mapeamentos é uma tarefa complexa de mensurar. Portanto, a matriz de erro e as precisões devem ser consideradas na avaliação da precisão da classificação.

TABELA 9. Cálculo do Kappa para a relação do SRTM versus Alos, Copernicus e Nasadem.

| Projetos | Parâmetros | |
|--|------------|---------------------|
| | Kappa | Exatidão Global (%) |
| Altitude | | |
| SRTM x Alos | 0,98 | 98,85 |
| SRTM x Copernicus | 0,98 | 98,68 |
| SRTM x Nasadem | 0,98 | 98,79 |
| Declividade | | |
| SRTM x Alos | 0,29 | 55,98 |
| SRTM x Copernicus | 0,34 | 59,23 |
| SRTM x Nasadem | 0,78 | 86,70 |
| Índice de rugosidade do terreno | | |
| SRTM x Alos | 0,17 | 40,07 |
| SRTM x Copernicus | 0,15 | 35,18 |
| SRTM x Nasadem | 0,62 | 72,88 |

Fonte: Autor (2024).

No entanto, ao analisar os dados de declividade (Tabela 7) verifica-se que a maior assertividade foi entre SRTM versus Nasadem, o que era possível de esperar, uma vez que o projeto Nasadem é uma versão melhorada dos dados do SRTM. Mesmo assim a assertividade do *Kappa*, ficou abaixo de 0,8, que é interpretado como “substancial” (LANDIS e KOCH, 1997). Para os dados do Alos e Copernicus a assertividade ficou entre 0,40 e 0,60, o que é considerado como “moderada (LANDIS e KOCH, 1997).

A discrepância entre a taxa de acertos e o índice *Kappa* é comum (MATHER, 2004), sendo que a primeira se baseia na matriz de erro e o segundo na média da precisão das classes (GANEM et al., 2017).

Dados do IRT analisados pelo índice *Kappa*, apresentou um baixo valor tanto do *Kappa* como da exatidão global. A assertividade entre SRTM e Nasadem ficou entre 0,40 e 0,60, o que é considerado como “moderada (LANDIS e KOCH, 1997) devido o Nasadem ser uma versão corrigida do SRTM. Já para o Alos e Copernicus a assertividade ficou abaixo de 0,40 representam concordância “fraca” (LANDIS e KOCH, 1997).

5 CONCLUSÃO

Os dados de altimetria dos projetos SRTM, Alos, Copernicus e Nasadem apresentam valores de kappa e exatidão global próximos, indicando que podem ser utilizados sem distinção entre os mapas.

Os modelos digitais de elevação dos projetos SRTM e Nasadem são muito similares e apresentam maior exatidão global no cálculo de declividade e índice de rugosidade do terreno

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALOS. ALOS World 3D - 30m. Acesso em: 27 de agosto de 2024. Disponível em: <https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTALOS.112016.4326.2>

ALASKA SATELLITE FACILITY. (2022). ASF. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/#/>.

ANJOS, M.M.S.; SILVA, A.M.; SILVA, A.S.; AZEVEDO, P.R.; BEZERRA, A.C. Estudo de relevo e potencial de uso do solo no município de São João – Pernambuco. *Brazilian Journal of Agroecology and Sustainability*, v.3, n.1, p.125-137, 2021.

BASTIN, J. F.; FINEGOLD, Y.; GARCIA, C.; GELLIE, N.; LOWE, A.; MOLLICONE, D.; REZENDE, M.; ROUTH, D.; SACANDE, M.; SPARROW, B.; ZOHNER, C. M.; CROWTHER, T. W. The global tree restoration potential. *Science*, v.365, n.6448, p.76-79, 2019.

BERTOL, I., AMARAL, A. J., VÁZQUEZ, E. V., GONZÁLEZ, A. P., BARBOSA, F. T., & BRIGNONI, L. F. Relações da rugosidade superficial do solo com o volume de chuva e com a estabilidade de agregados em água. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.3, n.3, p.543-553, 2006.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, 1998. 34p.

CARDOSO, J. M. M. A. Análise morfométrica das redes de polígonos em Permafrost - Adventdalen, Svalbard. 2014. Dissertação de mestrado. Instituto de Geografia e Ordenamento do Território, da Universidade de Lisboa, 2014.

COHEN, J.A. Coefficient of agreement for nominal scales. *Educational and Psychological Measurement*, v.20, p. 37-46, 1960.

COPERNICUS - Copernicus DEM - Global and European Digital Elevation Model (COP-DEM). Acesso em: 27 de agosto de 2024. Disponível em: <https://spacedata.copernicus.eu/collections/copernicus-digital-elevation-model>

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, R.; 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*, 45, RG2004

GANEM, K. A.; BAPTISTA, G. M. de M.; DA FRANCA ROCHA, W. de J. S.; VASCONCELLOS, R. N.; ROSA, M. R.; DE SOUZA, D. T. M. Comparação entre dados com e sem correção atmosférica na classificação da cobertura da terra de uma área da caatinga utilizando o google Earth Engine. *Revista Brasileira de Cartografia*, [S. l.], v. 69, n. 6, 2017

GOMES, E.B. Aplicação de análise de suscetibilidade a movimentos de massa em encostas naturais a partir de modelo digital de terreno de alta resolução. 2018. 39f. Trabalho de conclusão de Curso. Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, São Paulo, 2018.

HANSEN, M. C.; POTAPOV, P. V.; MOORE, R.; HANCHER, M.; TURUBANOVA, S. A.; TYUKAVINA, A.; THAU, D.; STEHMAN, S. V.; GOETZ, S. J.; LOVELAND, T. R.; KOMMAREDDY, A.; EGOROV, A.; CHINI, L.; JUSTICE, C. O.; TOWNSHEND, J. R. G. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, v.342, n.6160, p.850-853, 2013.

HENGL, T. Finding the right pixel size. *Computers & Geoscience*, v.32, p.1283-1298, 2006

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. Catálogo de Imagens. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/> .

IBGE - EMBRAPA - Mapa de Solos do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 2001 - Escala 1:500.000.

JAXA. Estratégia de Observação Sistemática ALOS - PALSAR. 2022. Disponível em: https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/obs/palsar_strat.html

JENSEN, J. R. Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective. Prentice Hall. 2007. 544p.

JUNIOR, G. B. Perfil de Mato Grosso do Sul. Disponível em: <http://www.ms.gov.br/institucional/>

LANDIS, J. R.; KOCH, G. G. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, United States, v. 33, n. 1, p. 159-174, 1997.

LILLESAND, T.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W.. Remote Sensing and Image Interpretation. Wiley, 2015. 736p.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND D. W. Geographical Information Systems and Science. Wiley, 2015. 496p.

MARQUES LEAL, J.; MARIA SABÓIA DE AQUINO, C.; JOHN LENNON TAVARES DA SILVA, F. Uso do mapa de Declividade e do Modelo Digital de Elevação na análise do relevo do município de São Miguel do Tapuío – Piauí. *Revista de Geociências do Nordeste*, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 97–107, 2019.

MACÊDO, R. J. A.; SURYA, L. Comparação entre modelos digitais de elevação dos sensores SRTM e ALOS Palsar para análise digital de terreno. *Revista Contexto Geográfico*, Maceió-al, v. 3, n. 6, p.47-55, dez. 2018.

MATHER, P.M. Computer processing of remotely sensed images: an introduction. 3^a Ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2004. 324p.

McMAHON, C. Lidar Survey of the San Pedro River, AZ 2021. National Center for Airborne Laser Mapping (NCALM). Distributed by OpenTopography, 2022. Acessado em 18 de novembro de 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.5069/G98050T2>

MITAS, L., MITASOVA, H., Spatial Interpolation. IN: P.LONGLEY, M.F. GOODCHILD, D.J. MAGUIRE, D.W.RHIND (Eds.), Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Management and Applications, GeoInformation International. Wiley, 1999, 481-492.

MOORE, I. D., et al. Soil moisture prediction using the topographic wetness index. *Water Resources Research*, v.27, n.5, p.765-774, 1991.

NASA JPL (2021). NASADEM Merged DEM Global 1 arc second V001. Distributed by OpenTopography. <https://doi.org/10.5069/G93T9FD9>. Acessado em: 27/08/2024

NASADEM. NASADEM Merged DEM Global 1 arc second. Acesso de 26 de agosto de 2024. Disponível em: https://lpdaac.usgs.gov/products/nasadem_hgtv001/

OLIVEIRA, A.M.M.; PINTO, S.A.F.; LOMBARDI NETO, F. Caracterização de indicadores da erosão do solo em bacias hidrográficas com o suporte de geotecnologias e modelo predictivo. *Estudos Geográficos, Rio Claro*, v.5, p.63-86, 2007

QGIS.org. QGIS Geographic Information System. QGIS Association. Disponível em: https://qgis.org/pt_BR/site/index.html . Acesso em: 10 de agosto de 2022.

RILEY, S.J.; DE GLORIA, S.D.; ELLIOT, R. A Terrain Ruggedness that Quantifies Topographic Heterogeneity. *Intermountain Journal of Science*, v. 5, n. 1-4, p. 23-27, 1999.

SALGADO, M.P.G.; CORTES, C.E.G.; CASTILLO, E.M. Caracterização das áreas geradoras de sedimentos provenientes dos processos erosivos em vertentes escarpadas. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Anais... Curitiba: INPE, 2011. P.1389-1396.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAÚJO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5 ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. 356 p.

SILVA, J.M.F.; MUDRE, M.R. Análise da Diversidade de Rugosidade do Terreno com emprego do Índice de Shannon: Estudo aplicado na APA da Serra da Esperança (PR). In: XII Simpósio Nacional de Geomorfologia - Sinageo, Anais... Crato, 2018. Disponível em: <https://www.sinageo.org.br/2018/trabalhos/5/5-144-159.html>

SRTM. NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second. Acesso em 27 de Agosto de 2024. Disponível em: <https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmg11v003/>

STEHMAN, S. V.; FOODY, G. M. Key issues in rigorous accuracy assessment of land cover products. Remote Sensing of Environment. v. 231, 1199, 2019.

VALERIANO, M. M. Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul. São José dos Campos, SP: Inpe, 2004. 72 p. Disponível em: <http://www.ecologia.ufrgs.br/labgeo/arquivos/downloads/dados/SRTM/publicacao.pdf>

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. Applied Geography (Sevenoaks), v.32, p.300-309. 2011