

MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO GERADOS COM SENSORES EMBARCADOS EM DRONES E SATÉLITES: ANÁLISE COMPARATIVA PARA PERÍCIAS AMBIENTAIS

Andrea dos Santos Vieira¹

Manuel Eduardo Ferreira²

RESUMO

Provas materiais em perícias ambientais exigem alta precisão, sendo fundamentais na identificação de crimes e eventual condenação de suspeitos. Modelos Digitais de Elevação (MDE) são essenciais para análises topográficas. Porém, dados gratuitos de sensores orbitais podem ter escalas inadequadas (baixa resolução espacial). Este estudo compara MDEs gerados por aerofotogrametria com RPAS (drones) e pelo Copernicus/DEM (baseado no satélite Sentinel 1), avaliando sua eficácia em perícias ambientais. Os resultados indicam maior acurácia dos MDEs de drones em medições de altura e declividade, validadas com GNSS geodésico RTK. Conclui-se que laudos periciais podem ser mais confiáveis com MDEs de RPAS, embora custo e tempo de processamento devam ser considerados.

PALAVRAS-CHAVE: Provas periciais. Meio ambiente. RPAS. Copernicus DEM.

DIGITAL ELEVATION MODELS GENERATED WITH SENSORS EMBEDDED IN DRONES AND SATELLITES: COMPARATIVE ANALYSIS FOR ENVIRONMENTAL EXPERTISE

ABSTRACT

Material evidence in environmental forensics requires high precision, playing a crucial role in identifying crimes and the potential conviction of suspects. Digital Elevation Models (DEMs) are essential for topographic analyses; however, free data from orbital sensors may have inadequate scales (low spatial resolution). This study compares DEMs generated by photogrammetry with RPAS (drones) and the Copernicus DEM (based on Sentinel-1 satellite data), assessing their effectiveness in environmental forensics. The results indicate that drone-based DEMs provide greater accuracy in height and slope measurements, validated with geodetic RTK GNSS. The study concludes that forensic reports can be more reliable with RPAS-generated DEMs, although cost and processing time should be considered.

¹Doutora pela Universidade Federal de Uberlândia - UFU, Email: dra.andreavieira@gmail.com

²Doutor pela Universidade Federal de Goiás - UFG, Instituto de Estudos Socioambientais - UFG, Email: manuel@ufg.br

KEYWORDS: Expert evidence. Environment. RPAS. Copernicus DEM.

MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN GENERADOS CON SENsoRES INTEGRADOS EN DRONES Y SATÉLITES: ANÁLISIS COMPARATIVO PARA EL PERIÓDICO AMBIENTAL

RESUMEN

Las pruebas materiales en peritajes ambientales requieren alta precisión, desempeñando un papel crucial en la identificación de delitos y la posible condena de sospechosos. Los Modelos Digitales de Elevación (MDE) son esenciales para los análisis topográficos; sin embargo, los datos gratuitos de sensores orbitales pueden tener escalas inadecuadas (baja resolución espacial). Este estudio compara los MDE generados por fotogrametría con RPAS (drones) y el Copernicus DEM, evaluando su eficacia en peritajes ambientales. Los resultados indican que los MDE de drones ofrecen mayor precisión en las mediciones de altura y pendiente, validadas con GNSS geodésico RTK. El estudio concluye que los informes periciales pueden ser más confiables con MDE generados por RPAS, aunque deben considerarse el costo y el tiempo de procesamiento.

PALABRAS-CLAVE: Prueba pericial. Ambiente. RPAS. Copernicus DEM.

INTRODUÇÃO

A produção de provas materiais em perícias ambientais deve ser mais que uma coleta de coordenadas e relatórios fotográficos. Precisa permitir ao operador do direito uma caracterização eficiente dos danos ambientais. Quando o convencimento produzido pelo laudo pericial é debilitado, o autor do dano pode ser absolvido, fato este recorrente. Por sua vez, a elaboração de provas periciais ambientais categóricas é facilitada com usos de materiais cartográficos eficientes, possibilitando a ampla caracterização dos danos ao meio ambiente.

Para as perícias ambientais, a geolocalização é de suma importância para determinar o crime. “Onde” o fato ocorre é essencial para definir a ilegalidade da atividade, trazendo à tona a importância da utilização cada vez mais intensa das geotecnologias, a fim de detectar as alterações na paisagem promovidas por interferências humanas. As supressões vegetais, incêndios florestais, desvio de cursos hídricos, obras em área de preservação permanente e barramentos são exemplos de alterações na paisagem facilmente detectáveis pelas atuais geotecnologias.

Desta forma, com o intuito de caracterizar os danos nocivos ao meio ambiente, o perito ambiental pode utilizar o Sensoriamento Remoto, os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), a Cartografia Digital, o Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS) e as Métricas da Paisagem obtidas direta e indiretamente com estes recursos (SILVA *et al.*, 2015). A base de dados pré-existente (ortofotos, imagens de satélites, cartas, mapas etc.), associada à novas geotecnologias, possibilita panoramas minuciosos da paisagem periciada, tornando os trabalhos de campo mais objetivos e eficientes (CALDAS *et al.*, 2009).

Especificamente, as bases cartográficas digitais e o sensoriamento remoto representam conjuntos de dados geoespaciais de referência, estruturados em um banco de dados de SIG, permitindo uma visão integrada do território (IBGE, 2019). Diversos fenômenos da superfície terrestre podem ser analisados pelo sensoriamento remoto, posto que a técnica desobriga o contato físico entre o objeto e o sensor, durante a aquisição das informações. Com a crescente demanda por dados geoespaciais, as técnicas para registro e processamento passaram por um acelerado desenvolvimento nos últimos anos.

Contando com uma gama de sensores, plataformas e aplicabilidades, o sensoriamento remoto vem favorecendo a aquisição de diferentes parâmetros do ambiente natural, tais como a caracterização do uso do solo e da altimetria do terreno, a partir de câmeras multiespectrais, sensores a laser (*Light Detection And Ranging - LiDAR*) e Radar, embarcados em aeronaves tripuladas e não tripuladas, ou em satélites artificiais (FLORENZANO, 2011).

Considerando os dados obtidos por sensoriamento remoto, estes possuem diversas aplicações, tais como análises ambientais, geológicas, meteorológicas e altimétricas, passando a ser uma ferramenta indispensável aos inventários, mapeamentos e monitoramento dos recursos naturais (SAUSEN, 2021). A precisão desses dados possibilita, por exemplo, a concepção de modelos matemáticos que representem com exatidão a superfície terrestre, por meio de uma modelagem da topografia, comumente denominada de Modelo Digital de Elevação (MDE, do inglês *Digital Elevation Model - DEM*).

Em perícias ambientais, a precisão e a acurácia são especialmente necessárias. A utilização de MDE possibilita que os cálculos sejam realizados de forma fidedignas. Diferentemente da identificação das áreas de preservação permanente (APP) ao longo de um curso hídrico, que exige

apenas a metragem linear desde a borda da calha do curso até o limite da vegetação, a APP de topo de morro possui especificidades topográficas em seu cálculo, como a declividade, a altura das elevações e a circunscrição das cotas altimétricas para delimitação dos terços do terreno (BRASIL, 2012). Para além das APPs de topos de morros, as encostas também necessitam do cálculo de declividade, fazendo jus à necessidade de um MDE.

Um MDE pode ser obtido pela digitalização de dados topográficos coletados em campo, dados de elevação por sensoriamento remoto aéreo e orbital, e ainda através de dados obtidos por laser scanner (HUTCHINSON & GALLANT, 1999). Assim, dentro da perspectiva de coleta de informações por sensoriamento remoto para produção de MDE, que consiste em calcular uma função tridimensional (x, y, z) capaz de representar as formas complexas da superfície, podem ser utilizadas combinações diversas de geotecnologias para geração dos dados planialtimétricos.

O objetivo desse artigo é avaliar as potencialidades de um MDE gerado por aerofotogrametria com RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*) ou drone, versus dados de satélites, neste caso obtidos pelo Programa Copernicus DEM, em perícias ambientais de APPs em topos de morros, que exigem especificidades topográficas acuradas. A área de estudo avaliada refere-se a uma elevação denominada Morro Santo Antônio, localizado no município de Senador Canedo, Goiás.

Justifica-se comparar os MDE produzidos por satélites e RPAS, ao se discutir sobre o melhor modelo em termos de acurácia, precisão e viabilidade, a ser utilizado em perícias ambientais com especificidades topográficas, a fim de se atingir boas provas materiais em crimes ambientais desta natureza. Ao comparar tais fontes de dados, espera-se a definição de uma metodologia com maior acurácia da informação, a ser disponibilizada aos possíveis beneficiários desta pesquisa, com dados validados estatisticamente.

Fontes de MDE

Entre os mecanismos de aquisição de informações para construção de um MDE, estão os dados obtidos em campo, onde as feições e padrões do relevo e suas relações com as estruturas e processos geológicos, geomorfológicos, altimétricos são mapeadas in loco. Isto é, um modelo

digital que representa as altitudes da superfície topográfica agregada aos elementos geográficos existentes sobre ela, como cobertura vegetal e edificações.

A coleta de elementos planialtimétricos exige o deslocamento até o campo, valendo-se de equipamentos como trenas a laser, teodolitos, lunetas de visada, níveis, estação total, entre outros, e ainda a expertise do operador para exatidão das medidas, tornando necessário, para acurácia devida ao levantamento topográfico, realizar procedimentos como medidas de reiterações e/ou repetições, o que por vezes onera os custos do levantamento, apesar da confiabilidade dos dados ser representativa.

Assim, a coleta de dados em nível de solo para a produção de MDE, pelo seu custo financeiro e temporal, acaba por compor levantamentos destinados a uma necessidade de maior precisão em escala local, como construção de barragens, estradas e obras de engenharia.

A combinação de dados topográficos obtidos em nível de solo com aéreos e orbitais é comum e indicada para acurácia na produção de MDE; a precisão é propiciada pelos pontos de controle instalados em campo e utilizados na ortorretificação das imagens, por exemplo.

Em relação às geotecnologias em nível aéreo, estas vêm sendo utilizadas de forma sistemática desde a segunda guerra mundial com a aquisição de dados realizada por sensores fotográficos acoplados em aeronaves tripuladas, técnica denominada como aerofotogrametria. Atualmente, esta técnica evoluiu para o uso de sensores digitais acoplados em aeronaves remotamente pilotadas, comumente chamadas de drones, ou pela sigla em inglês RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*). Além das câmeras fotográficas, configuradas para a produção das imagens estereoscópicas, pode-se embarcar outros sensores, tais como os termográficos, Radar, LiDAR, entre outras tecnologias de imageamento.

A aerofotogrametria possibilita a geração de MDE a partir de pares de imagens estereoscópicas de sensores ópticos. A aerofotogrametria realizada por aviões tripulados, apesar dos altos custos envolvidos, foi largamente utilizada pela facilidade de acesso a áreas remotas, elevada autonomia de voo, velocidade na aquisição das informações e precisão dos modelos gerados. Com a introdução dos RPAS, o custo para aquisição de fotografias aéreas foi significativamente reduzido.

A produção de MDE utilizando a fotografia aérea de visão tridimensional é altamente recomendada para escalas maiores, que necessitam de melhor detalhamento dos elementos ambientais. Devido às facilidades proporcionadas pela aerofotogrametria, essa geotecnologia é cada vez mais utilizada. O dinamismo de uma técnica deve estar alinhado à qualidade dos produtos gerados. O MDE gerado pela aerofotogrametria deve pautar-se em normas que o amparem em acurácia e precisão, levando em consideração métodos que mantenham sua confiabilidade, considerando, por exemplo, o uso de pontos de controle terrestre ou correção em tempo real (RTK) dos pontos de coordenadas coletados em voo.

O Decreto-Lei nº 89.817 de 1984 define o padrão brasileiro de acurácia posicional para dados espaciais. O Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e o Erro-Padrão (EP) traz as tolerâncias definidas em função da escala de avaliação dos dados espaciais e das classes A, B ou C. As Especificações Técnicas de Aquisição de dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV), criadas pela Diretoria do Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG), em 2010, explicam a forma correta para a aplicação do Decreto-Lei nº 89.817 de 1984, criando uma classe ainda mais restritiva destinada a produtos cartográficos digitais (PEC-PCD) (Santos et al., 2016; Brasil, 1984). A avaliação do PEC e do PEC-PCD em ortofotos obtidos por RPAS é basilar na determinação da carta topográfica produzida, sobretudo em grandes escalas.

Entre os procedimentos técnicos e jurídicos a serem seguidos pelos operadores de RPAS, é importante citar o Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial (RBAC-E), regido Agência Nacional da Aviação Civil (ANAC, 2015); este regulamento especial se aplica aos Veículos Aéreos Não Tripulados e aeromodelos, capazes de sustentar-se e circular no espaço aéreo mediante reações aerodinâmicas. O documento discorre sobre definições das aeronaves, responsabilidade do piloto, regras de voo, registros e marcas, certificados e demais convenções para a utilização destas.

Já em nível orbital, para a extração de um MDE, o programa *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), desenvolvido pela National Aeronautics and Space Administration (NASA) e o National Imagery and Mapping Agency (NIMA), foi uma revolução no mapeamento topográfico da Terra. Trata-se de uma missão realizada entre 11 e 22 de fevereiro de 2000 (11 dias), a bordo da nave espacial Endeavour, coletando dados digitais necessários para a elaboração de um modelo digital de elevação das terras continentais, entre os paralelos 56° S e 60° N (USGS, 2021).

A nave realizou 16 órbitas diárias na Terra, o que correspondeu a 176 órbitas durante toda a missão SRTM, criando um banco de dados com resolução radiométrica de 16 bits. Os MDEs foram organizados em tiles (cenas) de 1° x 1°, inicialmente com 30 m de resolução espacial para os Estados Unidos e 90 m para as outras localidades. Atualmente, é possível obter as imagens com 30 m de resolução espacial para todo o globo (USGS, 2021).

Entretanto, os dados SRTM já passaram por diversas correções a fim de melhorar a resolução horizontal. O Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) refinou a resolução espacial original de 3 arco-segundos (~90 m) para 1 arco-segundo (~30 m) por krigagem (VALERIANO, 2008). Assim, o produto SRTM TOPODATA oferece uma resolução espacial de 30 m para a produção de MDE.

Salienta-se que entre os reprocessamentos realizados com os dados SRTM, o NASA Digital Elevation Model - NASADEM é um produto que visa reprocessar os dados brutos do radar SRTM originais, usando algoritmos aprimorados e incorporando dados auxiliares, e produzindo e liberando publicamente um MDE com resolução espacial de 30 m, inclusive preenchendo os dados de elevação ausentes.

Os dados da missão SRTM, além dos produtos por reprocessamentos, servem também às correlações com diversos satélites para fins de melhoramentos de dados na produção de MDE, como é o caso do *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER) e do *Advanced Land Observing System* (ALOS, da Agência Espacial Japonesa).

Desde junho de 2009, a bordo do satélite Terra, os dados do ASTER Global DEM são providos pelo sensor ASTER. Este sensor coleta dados terrestres entre as latitudes de 83° Sul e 83° Norte. Sendo também um MDS (Modelo Digital de Superfície), os dados são disponibilizados com a resolução espacial de 30 m. O processo de pós-processamento, cruzando as informações do sensor ASTER com os dados do SRTM (30 m), melhorou em sobremaneira os dados ASTER de 120 m (inicialmente) para 70 m de resolução espacial (GROHMANN, 2015). Vale lembrar que, os elementos do SRTM são do tipo MDS, pois levaram em conta os elementos dispostos na superfície terrestre.

Em relação ao ALOS, este possui 3 sensores a bordo: PRISM (*Panchromatic Remote-sensing Instrument for Stereo Mapping*), AVNIR-2 (*Advanced Visible and Near-Infrared*

Radiometer – Type 2) e PALSAR (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar*). PRISM e AVNIR-2 são sensores ópticos e o PALSAR é um radar. O satélite ALOS (*Advanced Land Observing System*), lançado em 2006 pelo governo japonês, registra as imagens entre as latitudes de 59° Sul e 60° Norte. As imagens PRISM apresentam grande potencial de uso para mapeamento topográfico, tanto devido à sua alta resolução espacial (2,5 metros) quanto à sua capacidade estereoscópica, que torna possível a geração de Modelos Digitais de Elevação (MDE) (IBGE, 2009). Em 2015, a fim de corrigir geometricamente e radiometricamente algumas inconsistências, os dados foram reamostrados para a resolução de 30 m, a partir de dados SRTM, em seguida transformados novamente para uma resolução de resolução 12,5 m (SANTOS, 2009). Os números foram obtidos através do Serviço de Satélites do “Alasca 5”. Igualmente aos dados SRTM, os elementos do sensor PALSAR são coletados sob a forma de MDS. Em 2015, os dados do MDS “ALOS World 3D-30 (AW3D30)”, que é extraído das cenas adquiridas pelo sensor estéreo pancromático PRISM, passaram a ser disponibilizados gratuitamente, com resolução espacial de 30 m (JAXA, 2015).

Mais recentemente, o Copernicus DEM, da Agência Espacial Europeia (ESA), passou a ser mais uma opção para o mapeamento topográfico do globo terrestre. Chamado de COP-30, é um Modelo Digital de Superfície (DSM) derivado do produto WorldDEM, lançado em dezembro de 2020. Este MDE possui versão livre e com cobertura global, sendo derivado de interferometria de radar de abertura sintética (InSAR) financiado pelo governo alemão e pela *Airbus Defence and Space*. De acordo com Cremon et al. (2021), o MDE COP-30 possui o PEC-PCD melhor que os dados SRTM para outras áreas do Brasil, inclusive mais aperfeiçoados que os dados NASADEM e AW3D30 (BETTIOL et al., 2021).

O Copernicus DEM possui duas versões de cobertura global denominadas COP-30 e COP-90, também nomeada como GLO-30 e GLO-90. A denominação serve para identificar o tamanho do pixel. Enquanto o COP-30 é uma reamostragem do WorldDEM, com aproximadamente 30 m em sistema de coordenadas métricas na linha do Equador, a versão COP-90 é a reamostragem do pixel para 3 segundos de arco (aproximadamente 90 m) (AIRBUS, 2020). A Europa conta com uma cobertura restrita de aproximadamente 10 m (AIRBUS, 2020).

Ainda na esteira das novas geotecnologias, vale citar o uso do sensor LiDAR acoplado à Estação Espacial Internacional, programa denominado de GEDI (*Global Ecosystem Dynamics Investigation*). De acordo com a GEDI *Ecosystem Lidar* (2021), os produtos GEDI estão disponíveis em diferentes resoluções e intervalos de tempo. O instrumento GEDI produz observações a laser de alta resolução da estrutura tridimensional da Terra e coleta dados globalmente entre as latitudes 51,6° N e 51,6° S e com ótima amostragem para detecção e alcance de luz (LiDAR). Os produtos são derivados de ondas geolocalizadas, corrigidas e suavizadas, com uma resolução espacial média de 25 metros.

Por fim, neste extenso leque de opções para obtenção de MDEs, apresenta-se o ICESat, desenvolvido pela NASA para medir a variação na espessura de gelo da Terra, bem como características da topografia e da vegetação terrestre. De acordo com a NASA (2021), o ICESat (Gelo, Nuvem e Satélite de Elevação da Terra) é a missão do Sistema de Observação da Terra de referência para medir o balanço de massa da camada de gelo, alturas de nuvens e aerossóis, bem como topografia da terra e características da vegetação. De 2003 a 2009, a missão ICESat-1 forneceu dados de elevação plurianuais necessários para determinar o balanço de massa do manto de gelo, bem como informações sobre as propriedades das nuvens, especialmente para nuvens estratosféricas, comuns em áreas polares. Ele também forneceu dados de topografia e vegetação ao redor do globo, além da cobertura polar específica sobre as camadas de gelo da Groenlândia e Antártica. A adoção de uma abordagem sinérgica entre o GEDI e o ICESat-2, por exemplo, pode apoiar uma quantificação mais precisa e completa dos atributos topográficos, criando-se um MDE de alta precisão.

De acordo com Schutz et al. (2005), o ICESat utiliza uma altimetria de feixe de laser (LiDAR) para determinar as coordenadas geodésicas, que, por ser estreito, permitiu uma série de pontos nas calotas polares com precisão vertical da ordem de decímetros. As medidas do laser altimétrico ICESat fornecem detalhes únicos de regiões costeiras, incluindo níveis de corpos hídricos precisos, transições ininterruptas tanto da terra quanto da água, e altura de vegetações costeiras (URBAN et al., 2008).

O benefício da altimetria a laser se dá por sua maior precisão em solo (menor *footprint*) em relação à altimetria por radar. Sendo assim, o altímetro a laser emite radiações com comprimento de onda menores, diminuindo a abertura angular do feixe ($\Delta\theta$). Por outro lado, a altimetria a laser

peca na modelagem de efeitos de espalhamento atmosférico. Então, a técnica a laser não entrega medições através de nuvens espessas, ao passo que o altímetro por radar logra êxito sob qualquer condição climática (BRENNER et al., 2007).

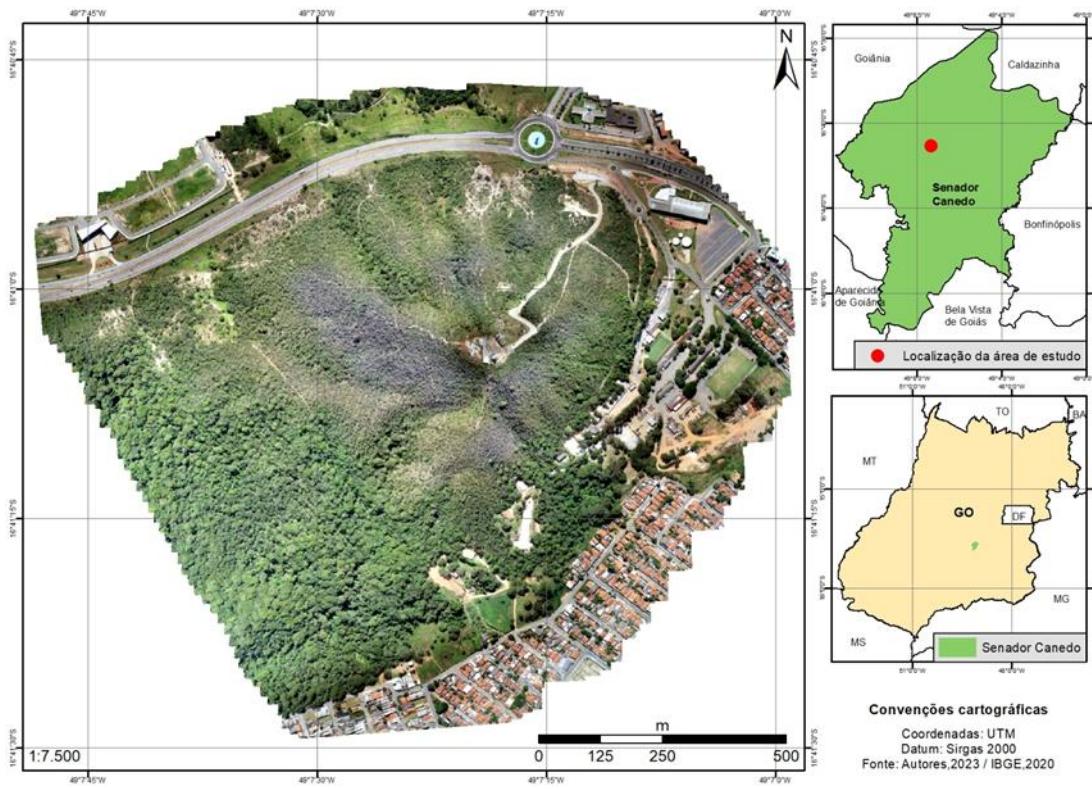
METODOLOGIA

Em linhas gerais, este estudo empregou um MDE extraído por uma aeronave multi-rotor, fabricante DJI, modelo Phantom 4 Pro, e 15 pontos de controle acurados, definidos por Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) *Real Time Kinematics* (RTK), orientado para o Datum Sirgas 2000. Para fins de comparação, escolheu-se o MDE de fonte orbital, distribuído pelo Programa Copernicus DEM (COP-30). Os MDEs utilizados atendem a uma escala compatível com o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) para a Classe A, definida pelo Exército brasileiro, conforme os padrões instituídos pelo Decreto Federal 89.817 de 20 de junho de 1984.

Área de Estudo

A escolha da área de estudo se deu por razões logísticas, dada sua proximidade do Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG) da Universidade Federal de Goiás (UFG), na cidade de Goiânia - GO, garantindo também boa acessibilidade a uma base de elevação representativa para esta pesquisa, visando a etapa de aerolevantamento. Isto é, enquanto os morros com vegetação densa em zonas rurais inviabilizaram a distribuição de pontos de controle para aferição do MDE produzido por aerolevantamento, a elevação do Morro do Cristo, em Senador Canedo - GO (município limítrofe à capital Goiânia), se encontra em zona urbana e com certo grau de antropização, possibilitando acesso para instalação de pontos de controle na produção do MDE por RPAS. Este morro se encontra entre as Latitudes 16°40'52"S e 16°41'29"S, e Longitudes 49°7'10"O e 49°7'37"O, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Morro do Cristo, em Senador Canedo (GO): imagem aérea gerada por RPAS (DJI Phantom 4 Pro), referente à 27 de abril de 2023.



Fonte: Os autores, 2023.

Procedimentos metodológicos

Os dados do MDE COP-30 foram adquiridos no repositório *OpenTopography* (ESA, 2021), no formato *GeoTIFF*. De acordo com a AIRBUS (2020), o produto oferece acurácia vertical relativa de < 2 m para áreas com declividade de superfície inferior a 20% e < 4 m para declividades maiores que 20%, *Datum* horizontal WGS84 e *Datum* vertical EGM2008. A manipulação do produto ocorreu no software QGIS 3.22 *Bialowieża*, de acesso livre. Os layouts dos mapas foram produzidos pelo software *ArcGis Advanced* (licenciado para o Núcleo de Geoprocessamento da ONG *Oreades*, usuário 404508). Devida à compatibilidade planimétrica do Datum SIRGAS 2000 e o WGS 84, e considerando o tamanho de pixel do MDE analisado (~30 m), manteve-se o *Datum* WGS 84, e extraiu-se as curvas de nível para identificação da altimetria.

Já em relação ao MDE obtido por aerolevantamento com drone, este ocorreu no dia 27 de abril de 2023, na elevação denominada Morro do Cristo, na cidade de Senador Canedo - GO. A aeronave utilizada foi o DJI Phantom 4 Pro, extremamente fácil de operar, ao mesmo tempo que robusto. Empregou-se o software *Litchi* for DJI drones V.4.26.2G (licenciado para conta Planex.sig) para o planejamento e execução do voo.

A altura de voo foi estabelecida em 120 m (aproximadamente 400 pés), atendendo a legislação do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA).

Foram implantados 15 pontos de controle, dos quais 10 pontos serviram para a ortorretificação do mosaico. As coordenadas tridimensionais dos alvos foram obtidas por posicionamento geodésico pelo método de posicionamento RTK (*Real Time Kinematic*). Um par de receptores (base e móvel) de sinais GNSS da marca TPS, modelo T20 PLUS, ambos configurados com taxa de gravação de um segundo, foram escolhidos para esta tarefa (cedidos pelo Instituto Federal de Goiás - IFG, unidade de Goiânia). A maior distância entre o receptor móvel e o receptor base foi de apenas 880 metros.

O cálculo da declividade (HORN, 1981), que serve como base para a definição do princípio legal de 25° de inclinação em topos de morro e de 45° para encostas, conforme determina a lei de crimes ambientais (BRASIL, 2012), foi executado no QGIS 3.22 *Bialowieża*. As ilustrações em 3D foram realizadas pelo software *Surfer* V.16 (licenciado para conta Planex.sig).

Para a geração de ortomosaico com retificação, baseado nos pontos de controle gerados com o GNSS RTK, utilizou-se o software *Agisoft Metashape* (licenciado para o Ministério Público de Goiás), atingindo-se um GSD real de 4.4 cm/pixel.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para uma devida proteção e preservação ambiental das APP com caráter topográfico, como por exemplo a APP de topo de morro ou encostas, faz-se necessário o delineamento dessas estruturas de acordo com o código florestal. O código florestal federal utiliza os conceitos de altura, declividade e divisão das elevações em terços (BRASIL, 2012). Caso os itens analisados atendam

aos requisitos, a área passa a ser considerada como APP, sendo imprescindível a avaliação desses elementos de forma precisa e acurada, fator determinante para utilização de um MDE, permitindo cálculos meticulosos dos princípios legais a serem atendidos.

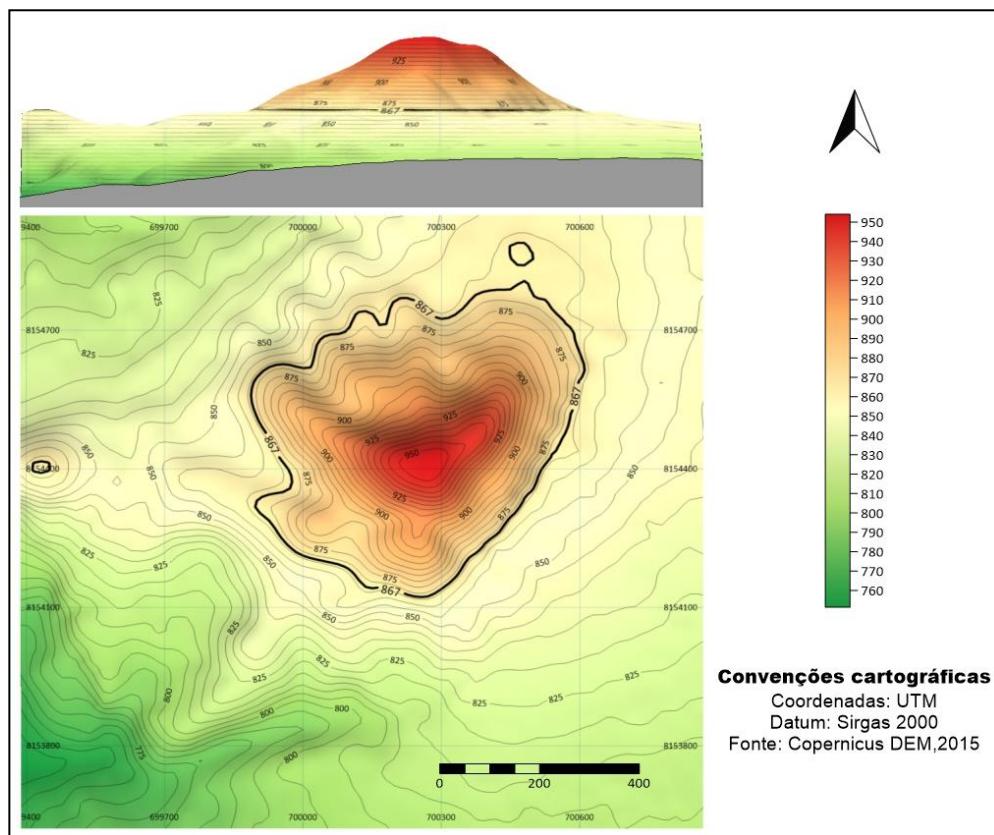
A análises dos MDE ocorrem em função do atendimento às necessidades da perícia ambiental, sem a pretensão em favorecer ou desmerecer os produtos. A maior parte das perícias ambientais produzidas no âmbito da Polícia Científica de Goiás são para áreas menores, de até 2 mil hectares. De acordo com dados obtidos junto à Secretaria de Segurança Pública de Goiás, a escala cartográfica que melhor atende as perícias ambientais é a de 1:10.000 (SSPGO, 2013).

Assim, neste estudo foram analisados o MDE adquirido pelo Programa Copernicus DEM e o MDE extraído via aeronave remotamente pilotada (RPAS), quanto às singularidades de uso em perícias ambientais.

MDE COP-30

Com base no produto MDE COP-30, foram extraídas curvas de nível, onde a cota 867 m foi identificada como a linha de base do Morro do Cristo, e o valor de 954 m como ponto cotado de topo desta elevação. A altura de 87 metros deixa a elevação abaixo do exigido pela legislação para que seja considerada um morro, mas sem prejuízos a este estudo e suas análises (Figura 2).

Figura 2. Morro de Cristo, em Senador Canedo (GO). Dados altimétricos gerados pelo MDE COP-30, referente à 27 de abril de 2023.



Fonte: *Copernicus DEM, 2020*. Elaboração: Os autores, 2023.

O cálculo da declividade média indicou um resultado de 32°. No caso de a elevação ter 100 m, a declividade atenderia a legislação federal, que exige uma declividade média de no mínimo 25°, para satisfazer ao requisito de declive e a elevação passar a ser considerada como um morro.

A declividade foi calculada para toda a área sobrevoada, incluindo o Morro de Cristo. Portanto, para declividade de encosta, seria necessário apenas escolher um ponto específico e verificar a declividade encontrada pelo software QGIS no ponto escolhido.

O terço superior da elevação não foi delimitado, pois a mesma não atende aos requisitos mínimos legais para ser considerada um morro (Brasil, 2012).

De acordo com Cremon et al. (2021), o COP-30 para o estado de Goiás e Distrito Federal atende à classe B na escala 1:25.000 e à classe A na escala 1:50.000, além de escalas inferiores. O COP-30 é um dos melhores MDEs da atualidade, com apenas 1 segundo de arco (30 m) (GUTH E GEOFFROY, 2021).

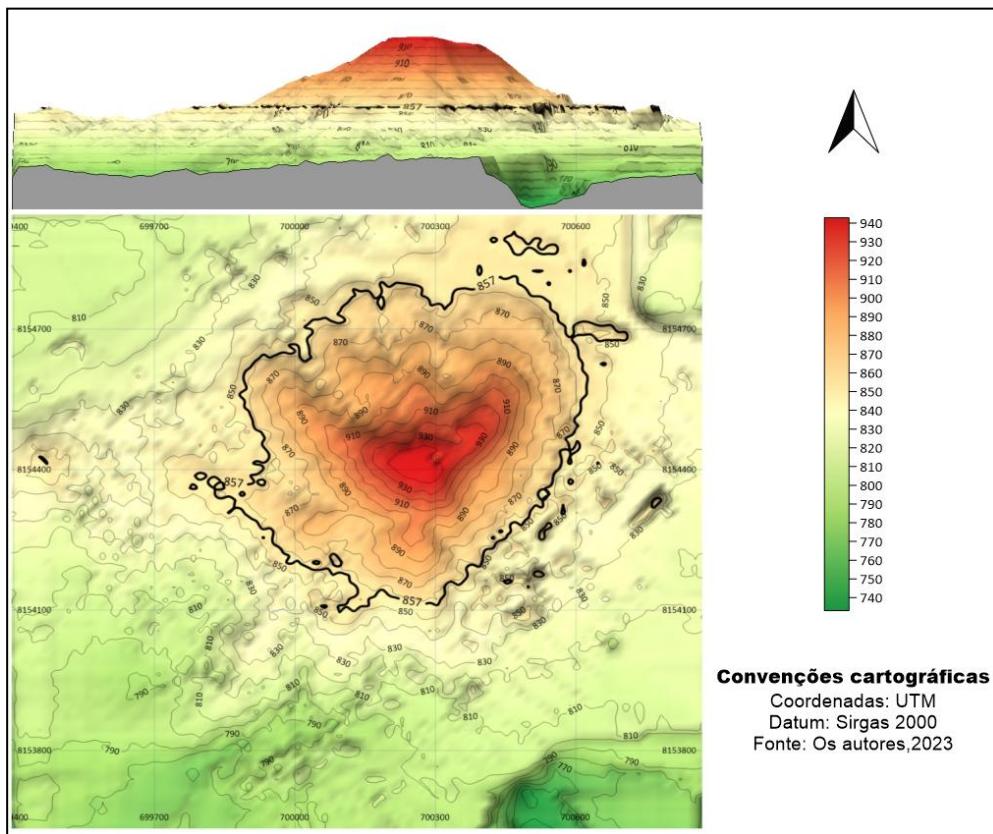
MDE RPAS

A partir dos pontos de controle e do produto cartográfico gerado pelas fotografias aéreas obtidas com o RPAS, realizou-se testes de acurácia e exatidão. Dos 15 pontos coletados via RTK, 5 pontos (P3, P6, P7, P9 e P13) foram utilizados no processamento, para melhorar a acurácia do ortomosaico, enquanto os outros 5 pontos (P2, P4, P8, P12 e P14) foram empregados para checagem/verificação da acurácia deste ortomosaico e outros 5 pontos foram descartados pois não atendiam aos requisitos de checagem.

Ressalta-se que o produto foi gerado com GSD de 4,4 cm e considerando como PEC Classe A, na escala 1:5353, sendo a escala comercial 1/10.000, com curvas de nível com equidistância de 10 metros. Quanto ao teste de tendência, o resultado do ortomosaico foi sem tendenciosidade nos eixos E, N e Z.

Após a extração das curvas de nível, a cota de 857 m foi considerada a linha de base, divergindo em 10 m do MDE COP-30 (Figura 3).

Figura 3. Morro de Cristo, em Senador Canedo (GO): Dados altimétricos gerados pelo MDE RPAS (DJI Phantom 4 Pro), referente à 27 de abril de 2023.



Fonte: Os autores, 2023.

O ponto cotado de maior altimetria foi de 942 m, discrepando em 12 m do MDE COP-30. O ponto mais alto da elevação encontrado via RTK foi de 944 m, corroborando com a acurácia do produto extraído via RPAS.

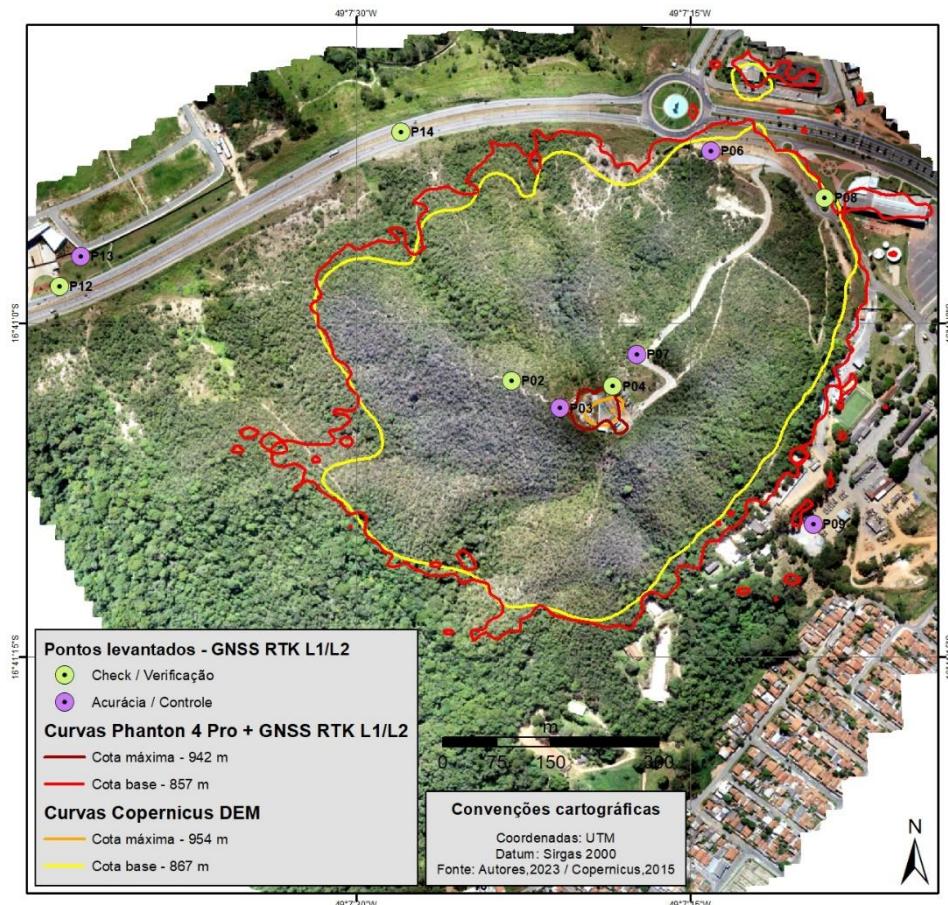
A declividade média trouxe um resultado de 29°, divergindo em 3° da declividade média calculada pelo MDE COP-30.

A altura encontrada a partir da linha de base e do ponto cotado ficou em 85 m. Para que a elevação seja considerada morro, a mesma deve possuir 100 m de altura. Portanto, a cota delimitando o terço superior da elevação não foi delineada, definição alcançada graças a este estudo.

Foram encontradas diferenças significativas entre os produtos cartográficos produzidos neste estudo. Tanto os valores das cotas altimétricas, quanto os detalhes fornecidos pelas curvas do MDE RPAS, estes foram mais precisos e detalhados do que o MDE COP-30, conforme observa-se na Figura 4.

Os pontos de controle obtidos com o GNSS RTK foram de suma importância para a construção acurada do MDE RPAS, de acordo com Alves Junior (2015), onde ortomosaicos apoiados com este método possuem menor erro e menor desvio padrão nas coordenadas planialtimétricas (Figura 4).

Figura 4. Morro Santo Antônio, em Senador Canedo (GO): Comparação de cotas altimétricas obtidas pelos MDEs COP-30 e RPAS (DJI Phantom 4 Pro), referente à 27 de abril de 2023.



Fonte: *Copernicus DEM, 2020*. Fonte: Os autores, 2023. Elaboração: Os autores, 2023.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao comparar as cotas altimétricas e pontos cotados gerados com modelos digitais de elevação (MDE) analisados neste estudo (RPAS e COP-30), nota-se que ambos são compatíveis com a escala de trabalho necessária em perícias ambientais. No entanto, os dados gerados com RPAS, apoiado com sistema GNSS geodésico, seja com pontos de controle em solo ou acoplado na aeronave, faz deste o equipamento ideal para diagnosticar crimes ambientais, com singularidades topográficas representadas por APPs de topo de morro.

A qualidade altimétrica do MDE gerado com dados RPAS se mostrou superior, alcançando a PEC-PCD Classe A nas normas brasileiras, na escala 1:10.000, enquanto que o MDE gerado com dados orbitais do Programa COP-30 atingiu a PEC-PCD Classe A na escala 1:50:000. Entende-se que tal diferença de qualidade se deva à elevada resolução espacial dos ortomosaicos, com GSD de 4 cm, em comparação aos satélites com pixels no terreno de 30 m. Outro diferencial foi a utilização de pontos de controle para obtenção de uma melhor acurácia no MDE por RPAS. Em zonas rurais, o mais aconselhado seria utilizar o sistema GNSS acoplado à aeronave, devido à dificuldade de fixar pontos de controle em áreas de vegetação de grande porte, e/ou com topografia bastante acidentada.

A utilização de Modelos Digitais de Elevação (MDE) na perícia ambiental poderá ser ainda mais eficiente se combinada com tecnologias emergentes, como inteligência artificial e aprendizado de máquina. Essas ferramentas permitem uma análise automatizada de padrões altimétricos e a detecção de alterações topográficas com maior precisão e rapidez, otimizando a produção de laudos periciais.

Adicionalmente, estudos futuros podem explorar a integração de diferentes sensores, como LiDAR e hiperespectral, para avaliar a influência da cobertura vegetal na precisão dos MDEs e sua aplicabilidade em diferentes tipos de terrenos. Tais avanços possibilitam que a perícia ambiental seja cada vez mais eficiente e juridicamente robusta, contribuindo para uma maior assertividade na tomada de decisões judiciais relacionadas a crimes ambientais.

Por fim, ressalta-se a necessidade da contínua atualização tecnológica e capacitação dos profissionais envolvidos na perícia ambiental. A adoção de metodologias modernas e de equipamentos mais precisos contribuirá significativamente para a confiabilidade das provas periciais, fortalecendo a aplicação da legislação ambiental e garantindo uma proteção mais efetiva dos ecossistemas afetados por atividades humanas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGeo) e ao Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento (LAPIG) da Universidade Federal de Goiás (UFG), em especial ao núcleo Pro-Vant, pelo acolhimento, infraestrutura e disponibilidade de recursos humanos e científicos a este projeto. Estendemos nossos agradecimentos à Polícia Técnico Científica do Estado de Goiás, pela inspiração e cooperação com a produção deste manuscrito. M.E.F. é bolsista de produtividade em pesquisa do CNPq (processo #317013/2023-8).

REFERÊNCIAS

AIRBUS. Copernicus Digital Elevation Model – Product Handbook. Airbus Defence and Space. 2020. Disponível em: <https://spacedata.copernicus.eu/documents/20123/121239/GEO1988-CopernicusDEM-SPE-002_ProductHandbook_I4.0.pdf>. Acesso em: 06 de ago. de 2023.

ALVES JÚNIOR, L. R. Análise de produtos cartográficos obtidos com câmera digital não métrica acoplada a um veículo aéreo não tripulado em áreas urbanas e rurais no estado de Goiás. 2015. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

BETTIOL, G. M.; FERREIRA, M. E.; MOTTA, L. P.; CREMON, É. H.; SANO, E. E. Conformity of the NASADEM_HGT and ALOS AW3D30 DEM with the Altitude from the Brazilian Geodetic Reference Stations: A Case Study from Brazilian Cerrado. **Sensors**, v. 21, n. 2935, 2021. DOI: [10.3390/s21092935](https://doi.org/10.3390/s21092935).

BRASIL, LEI nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Disponível em <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12651.htm>. Acesso em: 20 de jul. de 2022.

BRENNER, A. C.; DIMARZIO, J. P.; ZWALLY, H. J. **Precision and accuracy of satellite radar and laser altimeter data over the continental ice sheets.** IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 45, n. 2, p. 321 - 331, 2007. DOI: **10.1109/TGRS.2006.887172**

CALDAS, A. J. F. S.; ROTTA, G. V.; GÓES, E. K.; SCHAMNE, J. A. Sensoriamento remoto na perícia ambiental da polícia federal. In: Anais do XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (pp. 3621 - 3628). Natal: INPE, 2009.

COPERNICUS DEM. **GLO-30. Digital Elevation Model Welcome Guest.** Disponível em: <<https://portal.opentopography.org/raster?opentopoID=OTSDEM.032021.4326.3>>. Acesso em: 20 de jul. de 2022.

CREMON É.H.; BETTIOL G. M.; MAGNA JÚNIOR J. P.; MACEDO F. C.; RABELO M. W. O. Avaliação da altimetria do MDE COP-30 no Centro-Oeste do Brasil. **Rev. Bras. Cartografia,** ISSN 1808-0936 vol. 74, n. 3, 2022. DOI: **10.14393/rbcv74n3-60846**

FLOREZANO, T. G. Iniciação em Sensoriamento Remoto. 3º edição. São Paulo. **Oficina de Textos**, 2011.

GROHMAN, Carlos Henrique. Análise comparativa preliminar entre dados SRTM, Topodata, ASTER GDEM e Modelos de Superfície/Terreno do Projeto Radiografia da Amazônia. In: **Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto** (pp. 5726 - 5732), INPE: João Pessoa, 2015.

GUTH, P. L.; GEOFFROY, T. M. LiDAR point cloud and ICESat-2 evaluation of 1 second global digital elevation models: Copernicus wins. **Transactions in GIS**, v. 25, p. 2245 - 2261, 2021. DOI: **10.1111/tgis.12825**.

HORN, B.K.P. **Hill-Shading and the Reflectance Map.** Proceedings of the IEEE, vol. 69, n. 1, January 1981, pp. 14 - 47. DOI: **10.1109/PROC.1981.11918**

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Avaliação da qualidade de dados geoespaciais/ IBGE, Coordenação de Cartografia. 2. ed. - Rio de Janeiro: IBGE, 2019. 112p.: il. - (**Manuais técnicos em geociências**, ISSN 0103-9598; n. 13). ISBN 978-85-240-4500-4. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?id=2101152&view=detalhes>>. Acesso em: 04 de set. 2022.

Malha Municipal 2020. Disponível em:
<https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/estrutura-territorial/15774-malhas.html?edicao=30138>. Acesso em 20 de jul. de 2022.

JAXA - Japan Aerospace Exploration Agency. 2015. **ALOS Global Digital Surface Model “ALOS World 3D - 30m (AW3D30)”**. Disponível em: <<http://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/>>. Acesso em 15 nov. de 2022.

SANTOS, E. M. **Análise de Imagens do Satélite ALOS PALSAR (banda L, Modo Polarimétrico) para Discriminação de Coberturas de Terras do Distrito Federal**. 78 f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília, Brasília, 2009. DOI: [10.1590/S0102-261X2010000100014](https://doi.org/10.1590/S0102-261X2010000100014)

SAUSEN, T. M. **Sensoriamento Remoto e suas aplicações para recursos naturais**. Disponível em: <<http://www3.inpe.br/unidades/cep/atividadescep/educasere/apostila.htm>>. Acesso em: 03 de nov. de 2022.

SCHUTZ, B. E.; ZWALLY, H. J.; SHUMAN, C. A.; HANCOCK, D.; DIMARZIO, J. P. Overview of the ICESat Mission. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 21, p. 1 - 4. 2005. DOI: [10.1029/2005GL024009](https://doi.org/10.1029/2005GL024009)

SILVA, R. M.; INOCÊNCIO L. C.; REIS, B. S.; SOARES, G.; KIRSTEN, E. Fotos digitais obtidas com o uso de VANT para o mapeamento de áreas verdes do Campus da Unisinos em São Leopoldo: análise da exatidão posicional, utilizando o Software GEOPEC. In: Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (pp. 6281 - 6289). INPE: João Pessoa, 2015.

SSPGO - Secretaria de Segurança Pública de Goiás - **Manual de quesitação da seção de perícias ambientais da Polícia Científica de Goiás**. 2013. Goiânia, GO.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. *Earth Resources Observation and Science (EROS) Center. USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Non-Void Filled*. Disponível em: <https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-digital-elevation-shuttle-radar-topography-mission-srtm-non?qt-science_center_objects=0#qt-science_center_objects>. Acesso em: 01 de ago. de 2021.

URBAN, T. J.; SCHUTZ, E. B.; NEUENSCHWANDER, A. L. **A Survey of ICESat Coastal Altimetry Applications**: Continental Coast, Open Ocean Island, and Inland River. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, Taipei, v. 19, n. 1 - 2, pp. 1 - 19, 2008. DOI: [10.3319/TAO.2008.19.1-2.1\(SA\)](https://doi.org/10.3319/TAO.2008.19.1-2.1(SA))

VALERIANO, MÁRCIO DE MORISSON. **Topodata**: guia para utilização de dados geomorfológicos locais, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, São José dos Campos, 2008.