



Avaliação da altimetria do MDE COP-30 no Centro-Oeste do Brasil

Evaluation of altimetry from the COP-30 DEM in central-western Brazil

Édipo Henrique Cremon¹, Giovana Maranhão Bettiol², João Paulo Magna Júnior³, Fabio Campos Macedo⁴ e Max Well de Oliveira Rabelo⁵

1 Instituto Federal de Goiás, Grupo de Estudos em Geomática, Goiânia, Brasil. edipo.cremon@ifg.edu.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3174-7273>

2 Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Embrapa Cerrados, Planaltina, Brasil. giovana.bettiol@embrapa.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0619-3061>

3 Instituto Federal de Goiás, Grupo de Estudos em Geomática, Goiânia, Brasil. joao.paulo@ifg.edu.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8010-9625>

4 Instituto Federal de Goiás, Grupo de Estudos em Geomática, Goiânia, Brasil. fabio.macedo@ifg.edu.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3597-0413>

5 Instituto Federal de Goiás, Grupo de Estudos em Geomática, Goiânia, Brasil. maxwell.rabelo@ifg.edu.br.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1171-9400>

Recebido: 05.2021 | Aceito: 06.2022

Resumo: Este estudo analisa a acurácia posicional vertical dos dados coletados do modelo digital de elevação (MDE) do programa Copernicus DEM, denominado COP-30, baseado no Padrão Brasileiro de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), com as altitudes elipsoidais fornecidas por 317 estações de referência do Sistema Geodésico Brasileiro localizadas no estado de Goiás e Distrito Federal. O PEC-PCD definiu tolerâncias de erro de acordo com oito escalas diferentes (de 1:1000 a 1:250.000) e quatro classes de qualidade (variando de A a D). Com os dados em sistemas de coordenadas compatíveis e considerando o PEC-PCD classe A, o MDE COP-30 atende a escala 1:50.000 e escalas inferiores, enquanto para a classe B, o MDE COP-30 atende a escala 1:25.000 e escalas inferiores. O MDE COP-30 apresentou para o estado de Goiás e Distrito Federal raiz de erro quadrático médio de 1,98 m, indicando apresentar maior acurácia em relação a outros MDEs globais gratuitos.

Palavras-chave: Acurácia altimétrica. Modelo digital de elevação. PEC-PCD.

Abstract: This study analyzes the Brazilian Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products (PEC-PCD) of the digital elevation model (DEM) from Copernicus DEM program, denominated COP-30, with the ellipsoidal altitudes provided by 317 reference stations of the Brazilian Geodetic System located in federative units of Goiás and Distrito Federal (Brazil). The PEC-PCD defines error tolerances according to eight different scales (from 1:1000 to 1:250,000) and four quality classes (ranging from A to D). Considering class A, the DEM COP-30 meets the 1:50,000 scale and lower scales, while for class B, the DEM COP-30 meets the 1:25,000 scale and lower scales. DEM COP-30 presented lower values of root mean square error (RMSE=1.98 m), indicating that it presents higher accuracy compared to other global free DEM.

Keywords: Altimetric accuracy. Digital elevation model. PEC-PCD.

1 INTRODUÇÃO

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) se tornaram essenciais para a pesquisa em áreas como geomorfologia, hidrologia, climatologia, ciências agrárias, ciência do solo, biodiversidade e na cartografia. Por ser insumo de diferentes aplicações, os erros verticais dos MDEs podem se propagar durante todo o processamento de dados em que são utilizados e podem afetar negativamente os resultados (WECHSLER, 2007). Logo, é importante compreender a qualidade do MDE a ser utilizado em função da diversidade de aplicações (RAO et al., 2014). Atualmente, há diferentes MDEs globais ou quase globais gratuitos, cuja acurácia global destes produtos podem não representar a qualidade na área local, porque a qualidade do MDE

varia em escala regional (HAN et al., 2021).

Os dados *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), adquiridos no ano 2000, forneceram o primeiro conjunto de MDE quase global gratuito entre as latitudes 60°N e 56°S (RODRIGUES; PARADELLA; OLIVEIRA, 2011; FRAN et al., 2018; ORLANDI et al., 2019), sendo amplamente utilizados até hoje, apesar de limitações como a presença de vazios causados por sombras de radar e falta de cobertura em altas latitudes. Além do MDE SRTM, é possível destacar os dados ASTER GDEM e AW3D30 elaborados a partir de processamento fotogramétrico de imagens orbitais ópticas dos sensores ASTER e PRISM, a bordo dos satélites Terra e ALOS, respectivamente. Outro MDE quase global gratuito é o NASADEM que consiste no reprocessamento dos dados originais SRTM.

Alguns estudos científicos relataram a qualidade desses MDEs em regiões no Brasil (e.g. RODRIGUES; PARADELLA; OLIVEIRA, 2011; FRANÇA; ALMEIDA; PENHA, 2018; FRANÇA; PENHA; CARVALHO, 2019; ORLANDI et al., 2019; BETTIOL et al., 2021). Geralmente, a avaliação da acurácia altimétrica dos MDEs tem sido realizada com base na aplicação de normas baseadas na amostragem de pontos de referência e no MDE a ser avaliado (e.g. MORAIS et al., 2017; JAIN et al., 2017).

No Brasil, a acurácia posicional vertical dos MDEs é apresentada em termos de Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), de acordo com métricas de erro entre um dado de referência e o MDE, avaliado para diferentes escalas (p.ex.: 1:25.000, 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000), e classes A, B, C e D (veja item 2.3) (DSG, 2011; 2016a). Diferentes trabalhos têm usado a norma brasileira para avaliar a acurácia posicional vertical de MDEs em território nacional (e.g. FRANÇA; PENHA; CARVALHO, 2019; ORLANDI et al., 2019; BETTIOL et al., 2021).

Em dezembro de 2020, um novo MDE global e de acesso gratuito foi lançado pela Agência Espacial Europeia (ESA), o MDE COP-30 (também nomeado como GLO-30). Logo, são necessárias avaliações regionais sobre a acurácia posicional da altitude deste MDE, a fim de incluir uma gama mais ampla de condições de paisagem. Neste trabalho, a primeira avaliação da acurácia posicional absoluta vertical do COP-30 sobre o território brasileiro é apresentada através de uma comparação com dados altimétricos do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) abrangendo as unidades de federação de Goiás e Distrito Federal, no centro-oeste brasileiro.

2 METODOLOGIA

Para avaliar a acurácia posicional altimétrica do MDE COP-30 pela PEC-PCD, os dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) referentes às altitudes descritos na subseção 2.1 foram usados como referência (Figura 1). O MDE COP-30 avaliado neste estudo está descrito na subseção 2.2. Finalmente, na subseção 2.3, é apresentado o procedimento adotado para avaliar a acurácia posicional vertical do MDE pelo PEC-PCD.

2.1 Dados altimétricos de referência

O SGB, mantido pelo IBGE, se caracteriza como a infraestrutura geodésica fundamental para atividades de posicionamento, mapeamento e cadastro em âmbito nacional. Um conjunto de redes com vértices materializados no terreno fazem parte do SGB, dentre elas a planimétrica, a altimétrica e a planialtimétrica, as quais possuem um conjunto de estações com coordenadas geodésicas conhecidas (latitude, longitude e altitude). Os dados das estações geodésicas podem ser obtidos por meio do serviço denominado Banco de Dados Geodésicos (BDG) (IBGE, 2021).

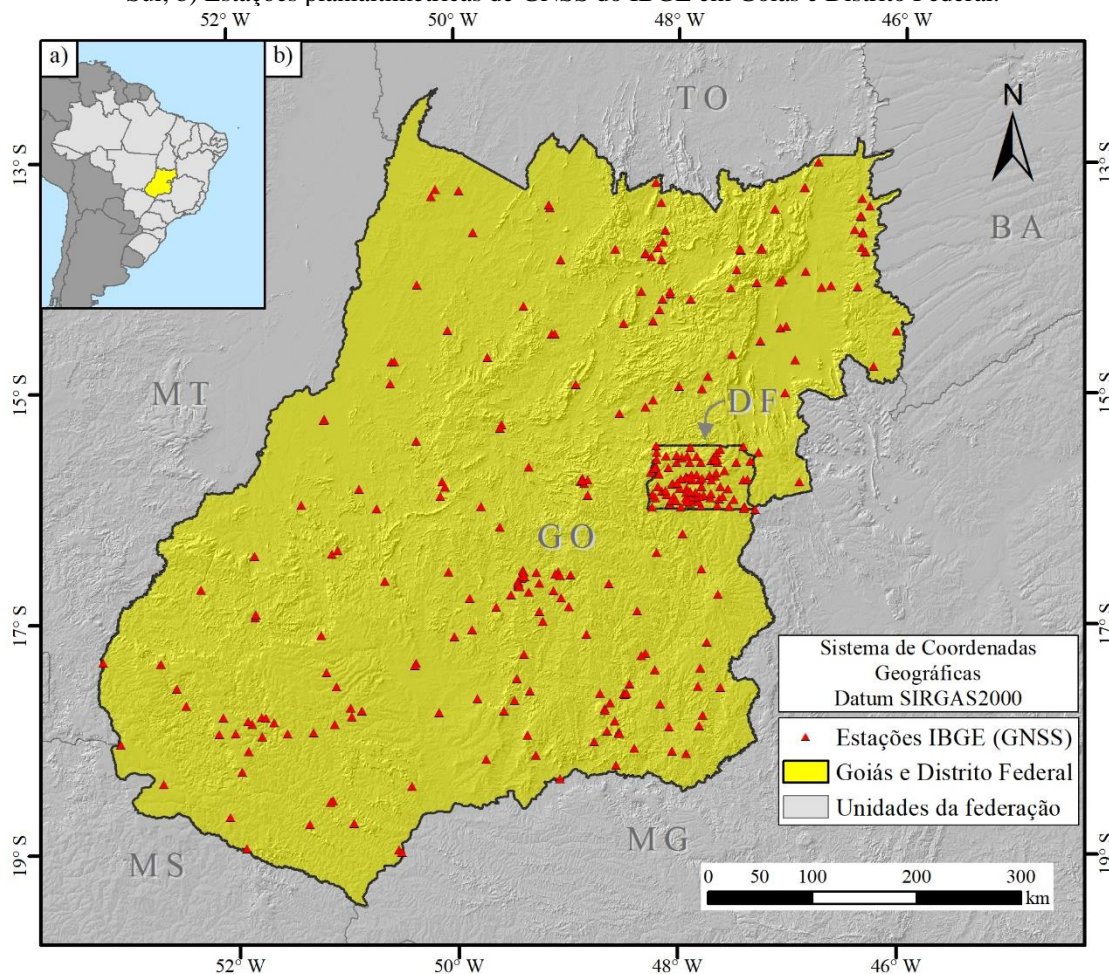
A Rede Altimétrica de Alta Precisão (RAAP) do SGB é composta por um conjunto de Referências de Nível (RN), estabelecidas desde 1945 por meio de nivelamento geométrico de alta precisão. Originalmente, a RAAP fornecia altitudes ortométricas, obtidas a partir dos desníveis entre as estações da rede. Em 2018, uma nova metodologia de cálculo foi estabelecida e a rede foi reajustada, com a incorporação da informação gravimétrica aos desníveis nivelados (IBGE, 2019). A partir de então, a RAAP passou a disponibilizar informações do número geopotencial e de altitudes normais das estações geodésicas. Entretanto, os valores planimétricos das estações de RN possuem fontes diversas como cartas topográficas de diferentes escalas e

Sistema Global de Navegação por Satélite (*Global Navigation Satellite System - GNSS*) de navegação cujos valores de desvio padrão para latitude e longitude são desconhecidos. Sendo assim, embora a qualidade altimétrica desses dados seja conhecida, a qualidade planimétrica é desconhecida. Mesmo que a planimetria não seja avaliada nesse trabalho, a precisão do posicionamento planimétrico das estações de referência é importante para a melhor comparação entre essas estações e os pixels com valores altimétricos correspondentes ao mesmo local.

O SBG também possui uma rede planialtimétrica composta por um conjunto de estações geodésicas baseadas em levantamentos pelo GNSS, classificadas como “GPS ou Doppler”, além de estações poligonais e os vértices de triangulação, estas últimas baseadas em levantamentos geodésicos convencionais (IBGE, 2021). As estações baseadas em satélite possuem altitudes associadas ao elipsóide do Sistema Geodésico de Referência de 1980 (*Geodetic Reference System 1980 – GRS80*) e coordenadas planimétricas com valores de desvio padrão das observações conhecidos para latitude e longitude inferiores a 1 cm. Para este trabalho foram selecionadas as estações baseadas em satélite com altitudes obtidas por GNSS como dado de referência para comparação com os dados do MDE COP-30, com valores médios de sigma altitude de 1,8 cm de acordo com os dados obtidos pelo BDG para a área de estudo.

A partir da rede planialtimétrica, foi possível encontrar 330 pontos no estado de Goiás e no Distrito Federal com altitude elipsoidal conhecida e oriunda de levantamento GNSS. Do total de 330 estações, treze foram descartadas por estarem localizadas em edificações de altura elevada em relação ao entorno, não refletindo assim a característica de um MDE com tamanho de pixel de aproximadamente 30 m (veja item 2.2), restando assim 317 pontos para validação (Figura 1).

Figura 1 - Localização da área de estudo. a) contexto do estado de Goiás e do Distrito Federal no Brasil e América do Sul; b) Estações planialtimétricas de GNSS do IBGE em Goiás e Distrito Federal.



Elaboração: Os autores (2022).

2.2 COP-30

O MDE COP-30 é uma das versões de livre acesso e de cobertura global do programa Copernicus DEM. Consiste em um modelo digital de superfície (MDS) que representa a superfície da Terra incluindo edifícios, infraestrutura e vegetação. Este MDE é derivado de interferometria de radar de abertura sintética (InSAR) em banda X da missão TanDEM-X e TerraSAR-X entre os anos de 2011 e 2015, sendo financiado por uma parceria público-privada entre o governo alemão, representado pelo Agência Aeroespacial Alemã (DLR) e a *Airbus Defence and Space*.

O processamento InSAR, calibração e mosaico foram feitos pela DLR formando o MDE TanDEM-X com tamanho de pixel de 0,4 segundos de arco (aproximadamente 12 m na linha do Equador) com altitude relativa ao elipsóide GRS80 (WGS84-G1150). Com base neste MDE, a *Airbus Defence and Space* faz um reprocessamento convertendo-o para altitude ortométrica com base no modelo geoidal EGM2008, o qual passa a se chamar de WorldDEM_{Core}. Esse MDE posteriormente é editado com preenchimento de vazios, edição das linhas costeiras, aplainando áreas de corpos d'água e tornando o MDE hidrológicamente consistente, esse MDS editado é comercial e chamado WorldDEMTM mantendo o mesmo tamanho de pixel de 0,4 segundos de arco (AIRBUS, 2019). Os dados WorldDEMTM são reamostrados e repassados para a ESA para compor o programa Copernicus DEM (AIRBUS, 2020).

Atualmente, o Copernicus DEM é fornecido em 3 versões gratuitas e duas de cobertura global denominadas COP-30 e COP-90, também nomeado como GLO-30 e GLO-90, respectivamente. Essas versões variam em tamanho de pixel, a COP-30 é uma reamostragem do WorldDEMTM por agregação de 0,4 para a 1 segundo de arco (aproximadamente 30 m em sistema de coordenadas métricas na linha do Equador), enquanto a COP-90 é a reamostragem do pixel para 3 segundos de arco (aproximadamente 90 m) (AIRBUS, 2020). O Copernicus DEM também está disponível com tamanho de pixel de 0,4 segundos de arco (aproximadamente 10 m) com uma cobertura restrita para a Europa (AIRBUS, 2020).

O Quadro 1 apresenta alguns parâmetros e especificações do MDE COP-30.

Quadro 1 – Parâmetros de especificação do MDE COP-30.

Formato	GeoTIFF e DTED
Tipo de dado	32 bits, <i>floating point</i> (formato DGED), isto é, a altitude é dada em números decimais 16 bits, inteiro (formato DTED), isto é, a altitude é fornecida em números inteiros (metro em metro)
Quadrículas	1° x 1° latitude/longitude
Sistema de Referência de Coordenadas	Coordenadas Geográficas
Datum horizontal	WGS84 (EPSG 4326)
Datum vertical	EGM2008 (EPSG 3855)
Tamanho do pixel	1 segundo de arco
Unidade vertical	Metros

Fonte: AIRBUS (2020).

As especificações técnicas dos produtos Copernicus DEM fornecem uma acurácia vertical relativa de <2 m para áreas com declividade de superfície inferior a 20% e <4 m para declividades maiores que 20% (AIRBUS, 2020). A consistência hidrológica do WorldDEMTM não pode ser assegurada para o COP-30 devido ao processo de reamostragem em sua elaboração. O MDE COP-30 pode ser adquirido pelo repositório de dados PANDA da ESA (2022) ou ainda pelo repositório OpenTopography (ESA, 2021).

2.3 Método de avaliação da PEC-PCD

O Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, estabeleceu as diretrizes regulamentadoras das normas técnicas cartográficas brasileiras, estabelecendo o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) nas quais parâmetros que as constituem são utilizados como referência três categorias de qualidade variando nas classes A, B e C para diferentes escalas de trabalho (BRASIL, 1984). O advento de novas tecnologias com a cartografia digital levou a uma revisão dos padrões estabelecidos pelo Decreto nº 89.817 e uma normativa mais restritiva foi

determinada para atender o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), agora com 4 classes, onde a classe A do decreto passou a ser a classe B, a classe B passou a ser C, a classe C passou a ser a D e a classe A da PEC-PCD possui critérios mais restritivos que a previamente proposta (DSG, 2011, 2016a).

Neste trabalho, a avaliação da altitude do MDE COP-30 (formato DGED) seguiu o PEC-PCD, publicado na 2ª edição da Especificação Técnica para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) versão 2.1.3 (DSG, 2011) e na Especificação Técnica para Controle de Qualidade dos Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) (DSG, 2016a).

O PEC-PCD para acurácia posicional vertical é baseado em métricas associadas ao erro (e_z) (Eq. 1) entre o produto cartográfico a ser avaliado, no caso da altimetria do MDE (Z_i), e um dado de referência (Z_{ref}) com precisão pelo menos três vezes superior ao produto avaliado (DSG, 2016a), sendo usado: a raiz do erro médio quadrático (REMQ) e o erro linear com 90% de probabilidade (LE90). É importante salientar que embora a ET-CQDG (DSG, 2016a) dê o nome de erro médio quadrático (EQM), a formulação matemática presente no documento corresponde a REQM. Na literatura internacional, o REMQ corresponde ao RMSE (*root mean square error*) (Eq. 2) e o LE90 corresponde a 1,6449 vezes o valor do RMSE (Eq. 3).

$$e_z = Z_i - Z_{ref} \tag{1}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_i - Z_{ref})^2}{n}} \tag{2}$$

$$LE90 = 1,6449 \times RMSE \tag{3}$$

Cada escala (1:1.000; 1:2.000; 1:5.000; 1:10.000; 1:25.000; 1:50.000; 1:100.000 e 1:250.000) possui um erro médio (EM) e um erro padrão (EP) que são classificados em níveis de qualidade do produto variando nas classes A, B, C e D. Na Tabela 1 é apresentado os valores EM e EP para as escalas menores.

Tabela 1 – Padrão de Exatidão Cartográfica para a Produtos Cartográficos Digitais em relação à acurácia altimétrica de MDEs. Valores para as escalas 1:25.000, 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000, de acordo com ET-ADGV (DSG, 2011).

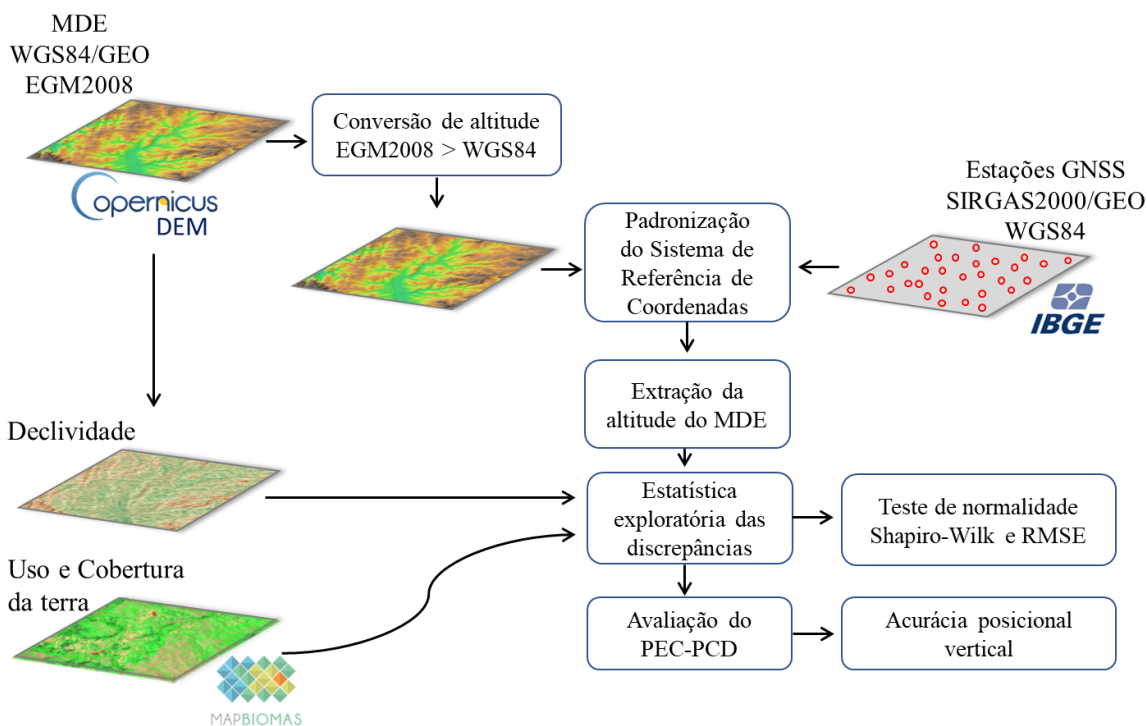
PEC – PCD	1:25.000		1:50.000		1:100.000		1:250.000	
	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)
A	2,70	1,67	5,50	3,33	13,70	8,33	27,00	16,67
B	5,00	3,33	10,00	6,66	25,00	16,66	50,00	33,33
C	6,00	4,00	12,00	8,00	30,00	20,00	60,00	40,00
D	7,50	5,00	15,00	10,00	37,50	25,00	75,00	50,00

Pelo PEC-PCD, o MDE para ser classificado em certa escala e classe, precisa considerar as seguintes condições:

- a) Noventa por cento dos pontos de validação de um MDE devem apresentar valores de erro iguais ou inferiores ao valor de tolerância EM da escala e da classe testada, quando comparados com os dados correspondentes ao dado de referência; e
- b) O RMSE das discrepâncias altimétricas deve ser igual ou menor do que a tolerância EP definida para cada escala e classe.

O MDE COP-30 está referenciado em coordenadas geográficas WGS84 (datum horizontal) e altitude ortométrica referenciada ao modelo geoidal EGM2008 (datum vertical). O modelo EGM2008 tem acurácia em 5-10 cm, uma melhoria de 3-6 vezes sobre o modelo EGM96 (PAVLIS et al, 2012) e que é utilizado nos MDEs SRTM, ASTER GDEM, AW3D30 e NASADEM. A fim de tornar o sistema de referência de coordenadas entre o MDE COP-30 e as estações GNSS do IBGE compatíveis, foi necessário converter o dado COP-30 de altitude ortométrica para altitude elipsoidal, somando o dado raster do MDE ao raster do modelo geoidal EGM2008 (AGISOFT, 2022) com o mesmo tamanho de pixel do MDE (1 segundo de arco) por interpolação bilinear (GROHMANN, 2018; BETTIOL et al, 2021). Como para o datum SIRGAS2000 e o WGS84 há uma compatibilidade planimétrica considerando o tamanho de pixel do MDE analisado (~30 m), a conversão não foi realizada. Com os dados compatíveis entre o datum horizontal e vertical, para cada ponto com altitude de referência foi extraído o valor de pixel da altitude elipsoidal do MDE COP-30 (Figura 2).

Figura 2 – Fluxograma metodológico utilizado na pesquisa.



Elaboração: Os autores (2022).

É importante ressaltar que muitos trabalhos que avaliaram a acurácia vertical de MDEs globais não realizaram a compatibilização entre a altitude ortométrica dos MDEs (fornecidas pelos modelos geoidais EGM96 ou EGM2008) com a altitude dos dados de referência. Rodrigues, Paradella e Oliveira (2011), Grohmann (2018) e Bettiol et al. (2021) são exemplos de trabalhos que realizaram essa compatibilização entre a altitude ortométrica dos MDEs e o dado de referência na avaliação de suas análises.

A qualidade altimétrica do MDE COP-30 foi estimada com a comparação das altitudes das estações de referência com base nos valores RMSE e nos valores LE90. Em seguida foi comparado cada valor de e_z com o EM da tabela PEC-PCD para cada classe (Tabela 1). O produto se enquadra quando tiver pelo menos 90% de pontos com erro inferior ao EM e o valor de RMSE inferior ou igual ao EP para a escala e classe identificada na Tabela 1.

Adicionalmente, foi avaliado se os erros atendem uma distribuição estatística normal pelo teste de Shapiro-Wilk, bem como pela análise exploratória dos dados com gráficos de histograma e quantil-quantil. Ainda foi avaliado a correlação entre o MDE COP-30 e os dados de referência, bem como a relação dos erros em função da declividade do MDE, bem como das classes de uso e cobertura da terra (Figura 2) referente ao ano de 2015 (último ano de coleta para a geração do dado), da base do projeto MapBiomias - coleção 5 (SOUZA et al., 2020). Essas etapas foram processadas pelos softwares GeoPEC 3.5.1 (SANTOS et al., 2016) e R (R CORE TEAM, 2021).

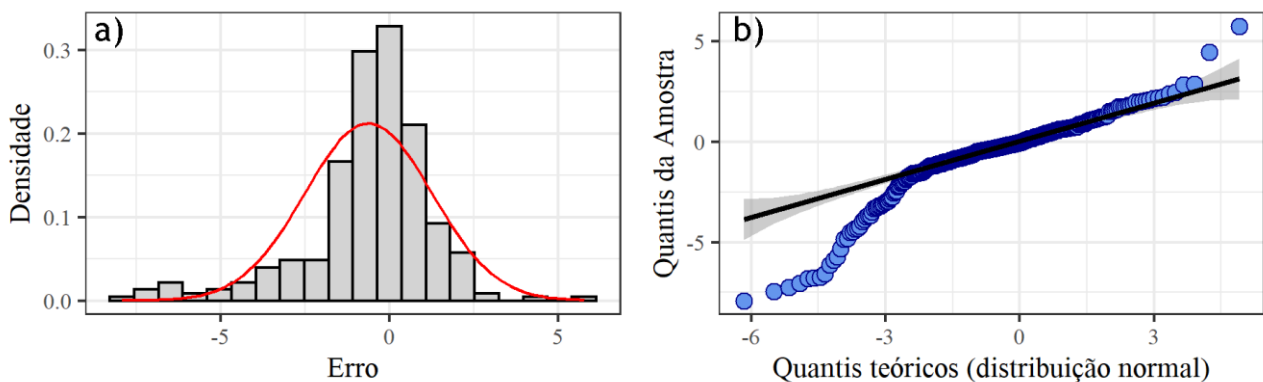
3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A avaliação do PEC-PCD foi conduzida em duas etapas. Primeiro, o RMSE foi calculado para o MDE COP-30 a fim de compará-lo com o EM de acordo com a escala e classe e, segundo, a comparação com o EP, também em função da escala e cada classe (Tabela 1). O RMSE do modelo foi de 1,98 m. Para atingir a classe A na escala 1:25.000 seria necessário que 90% dos 317 pontos analisados tivessem um erro inferior 2,70 m, entretanto 86,75 % dos pontos (275 estações) estavam abaixo desse valor de erro. Por esse critério, o MDE COP-30 não atende a essa classe e escala. O EM para a escala 1:25.000 classe B é de 5 m, por esse critério 95,5% dos pontos (304 estações) atendem esse critério e o RMSE está abaixo do EP. Logo, para o estado de Goiás e Distrito Federal é possível apontar que o COP-30 atende à escala 1:25.000 classe B, à escala 1:50.000 classe A, e às escalas inferiores.

O teste estatístico Shapiro-Wilks dos dados de erro sugere que sua distribuição é significativamente diferente da distribuição normal (p -valor $< 0,001$), ou seja, é possível assumir a não normalidade dos dados. Tal constatação é reforçada pela distribuição estatística dos dados que embora se aproxime de uma quase-normalidade pela distribuição do histograma (Figura 3-a), ainda é notável que pelo gráfico quantil-quantil a distribuição não seja normal (Figura 3-b). A questão da não normalidade dos dados na avaliação altimétrica é comum, inclusive é objeto de crítica para aperfeiçoamento do PEC-PCD no Brasil (CARVALHO; SILVA, 2018).

A avaliação entre os dados altimétricos do MDE COP-30 e os dados de referência altimétricos do IBGE, possui forte correlação com coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,99 (Figura 4-a). A distribuição do módulo dos erros entre o MDE COP-30 e o dado de referência mostrou que os maiores erros não estão associados a maiores valores de declividade uma vez que é possível encontrar maior valores de erro tanto em áreas mais planas como em áreas mais íngremes. Esta constatação difere outros trabalhos onde os erros dos MDEs analisados tendiam a aumentar com o aumento da declividade (e.g. MORAIS et al., 2017; JAIR et al., 2017).

Figura 3 – Visualização da distribuição estatística do erro entre o MDE COP-30 e os dados de referência do IBGE. a) histograma de densidade com a curva de distribuição normal (linha vermelha); e b) Gráfico quantil-quantil.



Elaboração: Os autores (2022).

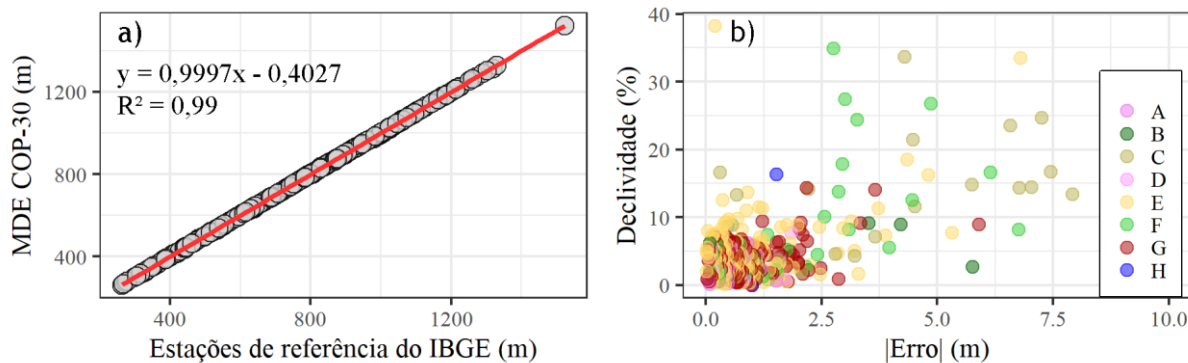
Também não há uma relação de ocorrer maiores erros em função da classe de uso e cobertura da terra (Figura 4-b). Maiores erros ocorreram em diferentes classes como formações campestres, savânicas, pastagem e infraestrutura urbana, mas não há um padrão já que menores erros também ocorreram nestas classes. Diferentemente de Jain et al. (2017), que ao comparar diferentes MDEs na Índia, constaram maiores erros em áreas urbanas em relação a áreas agrícolas ou florestadas.

Os resultados obtidos neste trabalho, para o Centro-Oeste do Brasil, corroboram com Guth e Geoffroy (2021), que avaliaram o COP-30 e outros MDEs globais em relação à dados obtidos por LiDAR (*Light Detection and Ranging*) e mostram que a acurácia vertical do COP-30 possui pouco efeito em relação à declividade e para diferentes classes de cobertura da terra. Em áreas com vegetação esparsa, o COP-30 parece estar logo acima do nível do solo medida pelo LiDAR, e em áreas com vegetação arbórea mais densa o COP-30 parece ser um modelo que fica entre o MDS e o modelo digital de terreno (MDT) (GUTH; GEOFFROY,

2021).

Os resultados apresentados mostram que, para a área de estudo, o MDE COP-30 possui o PEC-PCD melhor que os dados SRTM para outras áreas do Brasil (RODRIGUES; PARADELLA; OLIVEIRA, 2011; MORAIS et al., 2017; FRAN et al., 2018; FRANÇA; ALMEIDA; PENHA, 2018; ORLANDI et al., 2019) e melhor que os dados NASADEM e AW3D30 (BETTIOL et al., 2021). Os resultados obtidos estão de acordo com a especificação técnica global do MDE COP-30 (AIRBUS, 2020).

Figura 4 – a) Relação entre os dados do MDE COP-30 e as estações de referência do IBGE. b) Gráfico entre os erros da validação do MDE, a declividade e classes de uso e cobertura da terra, sendo: A - Agricultura, B - Formação Florestal, C - Formação Campestre, D - Outras Áreas não Vegetadas, E - Pastagem, F - Formação Savânica, G - Infraestrutura urbana, e H - Água.



Elaboração: Os autores (2022).

Gesch (2018), Grohmann (2018) e Guth e Geoffroy (2021) concluíram que TanDEM-X ou COP-30 são melhores a todos os outros MDEs globais com 1 segundo de arco. Para Guth e Geoffroy (2021) e Purinton e Bookhagen (2021) as melhorias são tão marcantes em relação aos outros MDEs que o COP-30 deve se tornar o “padrão ouro” para MDEs globais gratuitos a serem utilizados para representação paisagística e análise estatística em áreas sem cobertura suficiente de MDE locais de melhor qualidade.

Embora o tamanho do pixel do MDE COP-30 tenha 1 segundo de arco (aproximadamente 30 m em sistemas de coordenadas métricas) não seja o tamanho típico para um MDE na escala 1:25.000, esse tamanho ainda atinge o tamanho mínimo necessário, de acordo com Especificação Técnica para Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais (DSG, 2016b). Dado a pouca diferença de estações para atingir a classe A na escala 1:25.000, é possível que para outras regiões, ou mesmo com outro conjunto de dados de referência, esse produto possa apresentar melhor desempenho e atinga essa classe e escala de PEC-PCD, podendo ser útil para mapeamentos que envolvam informação altimétrica nas escalas 1:25.000 e 1:50.000, nas quais a região Centro-Oeste possui um grande vazio cartográfico.

O PEC-PCD é baseado em normativas que envolvem a tradicional comparação entre amostras de pontos de referência e o MDE a ser avaliado. Para Ariza-López e Reinoso-Gordo (2021), essa abordagem tem duas desvantagens: 1) os pontos utilizados nas avaliações são poucos em comparação com a área total de um MDE e, portanto, deixam grande parte do modelo sem avaliação; e 2) a avaliação de uma característica de superfície é feita por comparação de características de pontos, quando parece mais apropriado avaliar por comparação de superfícies. Purinton e Bookhagen (2021) ainda apontam como desvantagem dessa abordagem o fato de não capturar a variabilidade espacial do MDE, no qual as métricas baseadas em pontos não medem a consistência inter-pixel do MDE em um dado matricial, devido a alta variabilidade de elevação em pixels adjacentes em um MDE impactar as derivações geomorfológicas (e.g., declividade, orientação de vertentes e curvaturas) ou determinação de direção de fluxo para extração de rede de drenagem.

Nesse sentido, Ariza-López e Reinoso-Gordo (2021) propõem um método alternativo para avaliar a acurácia vertical de MDEs com base em superfícies ortogonais no qual é possível a detecção de *outliers* e de tendências ao avaliar o MDE e possibilitam a elaboração de funções de distribuição eliminando a necessidade de considerar as suposições de normalidade sobre os resíduos (ARIZA-LÓPEZ; REINOSO-GORDO, 2021). Tal método ainda não foi avaliado e pode ser explorado em estudos futuros.

Alguns trabalhos têm se preocupado em avaliar as formas de relevo, derivações geomorfológicas

(e.g. declividade e orientação de vertentes), rede de drenagem e consistência inter-pixel obtidas pelo MDE e não apenas a acurácia vertical do dado (POLIDORI; EL HAGE; VALERIANO, 2014; TOLENTINO, SILVA, SANTIL, 2017; MOZAS-CALVACHE, UREÑA-CÁMARA; ARIZA-LÓPEZ, 2017; ALBA-FERNÁNDEZ, 2021; PURINTON; BOOKHAGEN (2021). Nesse sentido, estudos complementares podem ser explorados para avaliar a qualidade das derivações possíveis de se extrair com o COP-30.

4 CONCLUSÃO

O estudo suporta a conclusão de que, para o Estado de Goiás e o Distrito Federal, a qualidade altimétrica dos dados do MDE COP-30 cumpriram os requisitos das normas brasileiras de PEC-PCD para mapas topográficos de 1:25.000 Classe B e 1:50:000 Classe A. Foram detectados efeitos de viés para o produto, expressos pela distribuição não normal dos erros para o MDE COP-30. Dado o vazio cartográfico na região Centro-Oeste do Brasil e para outras regiões, dados altimétricos derivados do MDE COP-30 mostram ser uma alternativa para programas de mapeamento topográfico semidetalhado em grandes setores do país, onde a informação altimétrica raramente está disponível ou apresenta baixa qualidade.

Contribuição dos Autores

Conceituação, E.H.C.; metodologia, E.H.C., G.M.B, J.P.M.J. e F.C.M.; software, E.H.C., J.P.M.J. e M.W.O.R.; validação, E.H.C., J.P.M.J. e F.C.M.; análise formal, E.H.C.; investigação, E.H.C.; curadoria de dados, E.H.C.; preparação de rascunho de redação, E.H.C.; visualização, E.H.C. e M.W.O.R.; revisão-escrita e edição, E.H.C, G.M.B, J.P.M.J., F.C.M. e M.W.O.R. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Conflitos de Interesse

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

- AGISOFT. **Global Geoid Models**. Disponível em: <<https://www.agisoft.com/downloads/geoids/>>. Acesso em: 25 abr. 2022.
- AIRBUS. **WorldDEM™: Technical Product Specification, version 2.5**. Airbus Defence and Space. 2019. Disponível em: <<https://bit.ly/3uiuEYI>>. Acesso em: 15 abr 2021.
- AIRBUS. **Copernicus Digital Elevation Model – Product Handbook**. Airbus Defence and Space. 2020. Disponível em: <<https://bit.ly/3eeoQtr>>. Acesso em: 15 abr 2021.
- ARIZA-LÓPEZ, F. J.; REINOSO-GORDO, J. F. Métodos de orlado para la evaluación de la exactitud altimétrica en los modelos digitales de elevaciones del terreno. **Revista Cartográfica**, n. 103, p. 33–45, 2021. DOI: 10.35424/rcarto.i103.975.
- 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.
- BRASIL. Decreto nº 89.817 de 20 de junho de 1984. Normas Técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial da União**, 20 de junho de 1984.
- CARVALHO, J. A. B.; SILVA, D. C. Métodos para avaliação da acurácia posicional altimétrica no Brasil. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 70, n. 2, p. 725-744, 30 jun. 2018. DOI: 10.14393/rbcv70n2-45404.
- DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO (DSG). **Especificações Técnicas para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV)**. 2 Ed., Brasília, 2011.
- DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO (DSG). **Especificação Técnica de Controle de Qualidade de**

- Dados Geoespaciais (ET-CQDG)**. 1 Ed., v. 2.1.3, Brasília, 2016a.
- DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO (DSG). **Especificação Técnica para Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-PCDG)**. 2 Ed., Brasília, 2016b.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Copernicus Global Digital Elevation Model**. Distributed by OpenTopography. Sinergise. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.5069/G9028PQB>. Acesso em: 25 mar. 2021.
- EUROPEAN SPACE AGENCY (ESA). **Copernicus Space Component Data Access PANDA Catalogue**. Disponível em: <https://panda.copernicus.eu/web/cds-catalogue/panda>. Acesso em: 10 mai. 2022.
- FRANÇA, L. L. S. D.; ALMEIDA, A. D. O. D.; PENHA, A. D. L. T. D. Avaliação da qualidade dos modelos digitais de elevação ASTER e SRTM para o estado da Bahia. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 9, 8 ago. 2018.
- FRANÇA, L. L. S. D.; PENHA, A. L. T.; CARVALHO, J. A. B. Comparison between absolute and relative positional accuracy assessment - a case study applied to digital elevation models. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 25, n. 1, 2019. DOI: 10.1590/s1982-21702019000100003.
- GESCH, D. B. Best practices for elevation-based assessments of sea-level rise and coastal flooding exposure. **Frontiers in Earth Science**, v. 6, 230, 2018. DOI: 10.3389/feart.2018.00230.
- GROHMANN, C. H. Evaluation of TanDEM-X DEMs on selected Brazilian sites: Comparison with SRTM, ASTER GDEM and ALOS AW3D30. **Remote Sensing of Environment**, v. 212, p. 121–133, 2018. DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.043.
- 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.
- HAN, H.; ZENG, Q.; JIAO, J. Quality Assessment of TanDEM-X DEMs, SRTM and ASTER GDEM on Selected Chinese Sites. **Remote Sensing**, v. 13, n. 7, 2021. DOI: 10.3390/rs13071304.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Reajustamento da rede altimétrica com números geopotenciais**. 2 Ed., Rio de Janeiro: IBGE, 2019.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Banco de dados geodésicos - BDG: O que é?**. Disponível em: <https://bit.ly/2PuSr8i>. Acesso em: 27 fev. 2021.
- JAIN, A. O.; THAKER, T.; CHAURASIA, P. P.; SINGH, A. K. Vertical accuracy evaluation of SRTM-GL1, GDEM-V2, AW3D30 and CartoDEM-V3.1 of 30-m resolution with dual frequency GNSS for lower Tapi basin India. **Geocarto International**, v. 33, n. 11, p. 1237-1256, 2017. DOI: 10.1080/10106049.2017.1343392.
- MORAIS, J.; FARIA, T.; ELMIRO, M.; NERO, M.; SILVA, A.; NOBREGA, R. Altimetry assessment of Aster Gdem V2 and SRTM V3 Digital Elevation Models: a case study in urban area of Belo Horizonte, MG, Brazil. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 4, p. 654-668, 2017. DOI: 10.1590/S1982-21702017000400043.
- MOZAS-CALVACHE, A. T.; UREÑA-CÁMARA, M. A.; ARIZA-LÓPEZ, F. J. Determination of 3D displacements of drainage networks extracted from Digital Elevation Models (DEMs) using linear-based methods. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 6, n. 8, p. 234, 2017. DOI: 10.3390/ijgi6080234.
- ORLANDI, A. G.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; BIAS, E. S.; CORRÊA, D. C.; GOMES, R. A. T. Vertical accuracy assessment of the processed SRTM data for the Brazilian territory. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 25, n. 4, 2019. DOI: 10.1590/s1982-21702019000400021.
- PAVLIS, N. K.; HOLMES, S. A.; KENYON, S. C.; FACTOR, J. K. The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008). **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 117, n. B4, p.1-38, 2012. DOI: 10.1029/2011JB008916.
- POLIDORI, L.; EL HAGE, M.; VALERIANO, M. M. Digital elevation model validation with no ground

- control: application to the Topodata DEM in Brazil. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 20, n. 2, p. 467-479, 2014. DOI: 10.1590/S1982-21702014000200027.
- PURINTON, B.; BOOKHAGEN, B. Beyond Vertical Point Accuracy: Assessing Inter-pixel Consistency in 30 m Global DEMs for the Arid Central Andes. **Frontiers in Earth Science**, v. 9, p.1-24, 2021. DOI: 10.3389/feart.2021.758606.
- R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna (Austria), 2021. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.
- RAO, Y.; DEO, R.; NALINI, J.; PILLAI, A.; MURALIKRISHNAN, S.; DADHWAL, V. Quality assessment of TanDEM-X DEMs using airborne LiDAR, photogrammetry and ICESat elevation data. **ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.** v. 2, n. 8, p. 187-192, 2014. DOI. 10.5194/isprsannals-II-8-187-2014.
- RODRIGUES, T. G.; PARADELLA, W. R.; OLIVEIRA, C. G. Evaluation of the altimetry from SRTM-3 and planimetry from high-resolution PALSAR FBD data for semi-detailed topographic mapping in the Amazon Region. **An. Acad. Bras. Ciênc.**, Rio de Janeiro, v. 83, n. 3, p. 953-966, 2011. DOI: 10.1590/S0001-37652011000300014.
- SANTOS, A. P.; RODRIGUES, D. D.; SANTOS, N. T.; GRIPP JÚNIOR, J. Avaliação da acurácia posicional em dados espaciais utilizando técnicas de estatística espacial: Proposta de método e exemplo utilizando a norma brasileira. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 22, p. 630-650, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1982-21702016000400036>.
- SOUZA, C. M. et al. Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. **Remote Sensing**, v. 12, 2020. DOI: 10.3390/rs12172735.
- TOLENTINO, F. M.; SILVA, C. R.; SANTIL, F. L. P. Avaliação da acurácia posicional de redes de drenagem obtidas a partir de modelos SRTM e ASTER com o uso dos softwares ArcGIS e QGIS. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69, n. 7, p. 1287-1301, 2017.
- WECHSLER, S.P. Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: A review. **Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.**, v. 3, p. 1481–1500, 2007. DOI: 10.5194/hess-11-1481-2007.

Biografia do autor principal



Édipo Henrique Cremon é formado em Geografia pela Universidade Estadual de Maringá, Brasil, em 2009, e é Mestre e Doutor em Sensoriamento Remoto pelo INPE, São José dos Campos, Brasil, em 2012 e 2016, respectivamente. Ele está no IFG desde 2016 como professor em sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica (SIG). Seus interesses de pesquisa incluem técnicas de análise e aprendizado de máquinas (*machine learning*) aplicadas a dados geoespaciais para análise ambiental e geomorfológica.



Esta obra está licenciada com uma Licença [Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) – CC BY. Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.