

ACURÁCIA DE PONTOS DE PROJEÇÃO CARTOGRÁFICA DE ORTOFOTOS OBTIDAS COM AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA (RPA)

*Accuracy of points of cartographic projection of orthophotos
obtained with remotely piloted aircraft (RPA)*

*Precisión de los puntos de proyección cartográfica de ortofotos
obtenidos con aeronaves pilotadas a distancia (RPA)*

*Précision des points de projection cartographique des
orthophoto obtenus avec des aéronefs pilotés à distance (RPA)*

RESUMO

Este estudo avaliou três ortofotos, geradas a partir de aerolevantamentos configurados em 80 m, 100 m e 120 m de altura com RPA do tipo multirrotor, modelo Phantom 4 Pro da empresa DJI acoplada ao sensor Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) de 1 polegada de 20 megapixels, em uma propriedade localizada as margens da Rodovia Agostinho Ducci (PR-218), zona rural do município de São Sebastião da Amoreira no estado do Paraná, Brasil. O objetivo foi avaliar a acurácia posicional de pontos de projeção cartográfica em ortofotos obtidas de sensor a bordo de aeronaves remotamente pilotadas (RPA) utilizando pontos de apoio no georreferenciamento das imagens. A avaliação da acurácia foi realizada a partir da análise de tendência e precisão, sendo os resultados classificados conforme o Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) para a escala 1:1.000.

PALAVRAS-CHAVE: Ortofoto; Modelo Digital de Elevação; Topografia.

AGOSTINHO PRADO ALVES JUNIOR

*Doutorando no Programa de
Pós-Graduação em Geografia
da Universidade Estadual de
Londrina – UEL.*

agostinho.prado@uel.br

LUCIANO NARDINI GOMES

*Pós Doutor (2020) UNESP/
Botucatu -SP e docente
do Departamento de
Geociências da Universidade
Estadual de Londrina - UEL*
lunago@uel.br

Artigo recebido em:
18/08/2021

Artigo aprovado em:
29/06/2022

ABSTRACT

This study evaluated three orthophotos, generated from aerial surveys configured at 80 m, 100 m and 120 m in height with multirrotor RPA, model Phantom 4 Pro from the company DJI coupled to Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) sensor of 1 inch of 20 megapixels, on a property located on the banks of Rodovia Agostinho Ducci (PR-218), rural area of the municipality of São Sebastião da Amoreira in the state of Paraná, Brazil. Of remotely piloted aircraft (RPA) using support points in the georeferencing of images. Accuracy was assessed based on trend and precision analysis, and the results were classified according to the Cartographic Accuracy Standard for Digital

Cartographic Products (PEC-PCD) for a scale of 1:1.000.

KEYWORDS: Orthophoto; Digital Elevation Model; Topography.

RESUMEN

Este estudio evaluó tres ortofotos, generadas a partir de levantamientos aéreos configurados a 80 m, 100 m y 120 m de altura con RPA multirrotor, modelo Phantom 4 Pro de la empresa DJI acoplado a sensor Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) de 1 pulgada de 20 megapíxeles, en una propiedad ubicada a orillas de Rodovia Agostinho Ducci (PR-218), área rural del municipio de São Sebastião da Amoreira en el estado de Paraná, Brasil. De aeronaves pilotadas a distancia (RPA) utilizando puntos de apoyo en la georreferenciación de imágenes. La exactitud se evaluó con base en análisis de tendencias y precisión, y los resultados se clasificaron de acuerdo con el Estándar de Precisión Cartográfica para Productos Cartográficos Digitales (PEC-PCD) para una escala de 1: 1.000.

PALABRAS-CLAVE: Ortofoto, Modelo Digital de Elevación, Topografía

RÉSUMÉ

Cette étude a évalué trois orthophotos, générées à partir de relevés aériens configurés à 80m, 100m et 120m de hauteur avec RPA multirrotor, modèle Planton 4 Pro de la société DJI couplé à un capteur Complémentaire Métal Oxyde Semi-conducteur (CMOS) de 1 pouce de 20 mégapixels, sur une propriété située sur les rives de la Rodovia Agostinho Ducci (PR-218), zone rurale de la municipalité de São Sebastião da Amoreira dans l'état de Paraná, au Brésil. La précision a été évaluée sur la base d'une analyse des tendances et de la précision et les résultats ont été classés selon la norme de précision cartographique pour les produits cartographiques numériques (PEC-PCD) sur une échelle de 1 :1000.

MOTS-CLÉS: Orthophoto, Modèle numérique d'élévation, Topographie.

INTRODUÇÃO

O uso de Aeronave Remotamente Pilotada (RPA), pode ser entendido como uma evolução no mapeamento aéreo, similar à aerofotogrametria convencional. Embora a aerofotogrametria apresente uma série de

aplicações nos mais diferentes campos e ramos das ciências, sua maior aplicação é no mapeamento topográfico, aplicação esta que também passa a ser realizada com o RPA. A terminologia RPA, foi adotada pelo



Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia e do Departamento de Geografia da UFES

Janeiro-Junho, 2022
ISSN 2175-370

Departamento de Controle do Espaço Aéreo Brasileiro, onde visa também esclarecer os procedimentos necessários para realização dos voos de RPA no espaço aéreo Brasileiro (DECEA, 2017).

Esta tecnologia permite que profissionais com pouca ou nenhuma experiência cartográfica utilizem o RPA para geração de mapas. No entanto, o não conhecimento da acurácia e discrepâncias posicionais de pontos de projeção cartográfica presentes em seus produtos acabam trazendo incertezas quanto à qualidade do mapeamento.

A grande maioria das operações fotogramétricas realizadas com RPA destinam-se ao mapeamento, como os realizados nas ciências geográficas. De acordo com Tommaselli (2006), quando as fotografias aéreas são usadas para mapeamento, as linhas de voo são alocadas no mapa, de tal maneira, que faixas vizinhas tenham uma região comum de superposição lateral, que geralmente, é de 25% a 30% da cobertura da foto. Ainda segundo o autor, cada fotografia na linha de voo cobre uma área que se superpõe com as fotos anteriores em, cerca de, 60%. Contudo, o recobrimento das imagens obtidas por um levantamento por RPA é maior que na fotogrametria convencional, de cerca de 70 – 80% longitudinal e lateral (SILVA et al., 2014). Esta superposição é chamada superposição longitudinal e possui três finalidades básicas:

- Permitir a cobertura do terreno de dois pontos de vista distintos, ou seja,

observação estereoscópica, que proporcionam uma vista tridimensional e criam a ilusão de que o observador está vendo um modelo 3D do terreno.

- A construção de mosaicos, aproveitando-se somente a porção central de cada fotografia, onde o deslocamento devido ao relevo e as distorções são menores;
- A geração de pontos de apoio por métodos fotogramétricos, a fototriangulação (ou aerotriangulação), isto é, ponto de passagem ou marcação.

Por isso, o cenário tridimensional construído só é possível graças ao fenômeno da paralaxe estereoscópica, que permite uma visão 3D em fotografias com 60% ou mais de sobreposição. Coelho & Brito (2007) definem a paralaxe estereoscópica como o deslocamento aparente na posição de um objeto, em relação a um ponto de referência, causado pela mudança na posição de observação.

Embora, a sobreposição permita uma vista tridimensional de ilusão de que o observador está vendo um modelo 3D do terreno, os *softwares* de processamento empregam a técnica de processamento *Structure from Motion (SfM)*, que utilizam algoritmos para identificar recursos correspondentes nos conjuntos de imagens digitais sobrepostas. Nesta técnica é calculada a localização e a orientação da câmera a partir das posições diferenciais de vários recursos corresponden-

tes. Com base nesses cálculos, as imagens sobrepostas podem ser usadas para reconstruir um modelo de nuvem de pontos 3D esparsa da superfície fotografada. Essa nuvem de pontos é, geralmente, refinada para uma resolução muito mais fina da nuvem de pontos densa, usando os métodos *Multi-View Stereo (MVS)*, completando assim o fluxo de trabalho do *SfM-MVS* (CARRIVICK et al., 2016).

A Figura 1, apresenta o esquema da linha de voo com as sobreposições laterais e longitudinais com os critérios descritos acima, sendo:

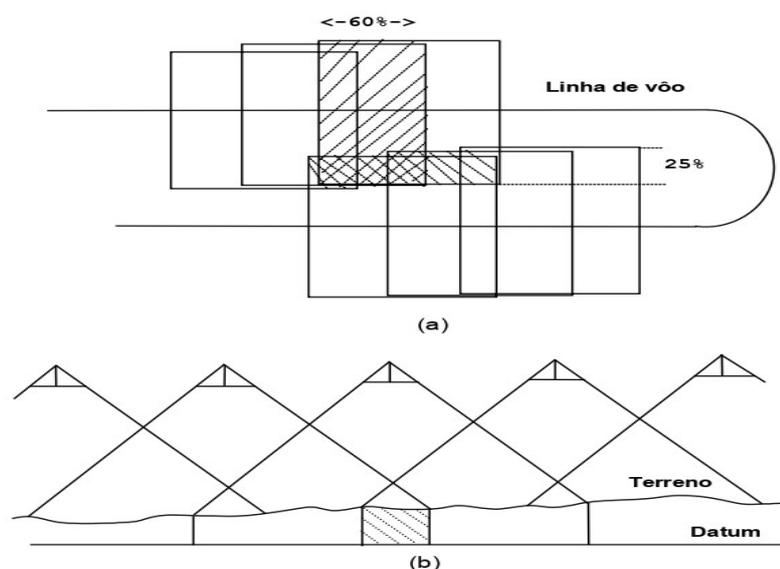
- A. Vista superior de duas faixas mostrando a superposição longitudinal e a superposição lateral;
- B. Perfil esquemático mostrando a cobertura longitudinal de cada fotografia.

Para ser possível realizar medições de objetos, isto é, o mapeamento por meio da foto-

grametria, são necessárias duas categorias de orientação para as fotografias: orientação interior e orientação exterior. A orientação da imagem em relação ao sistema cartográfico é designada de orientação exterior. Para Andrade (1998), por meio dela são obtidas as coordenadas e atitudes do centro perspectivo da câmera no sistema de coordenadas de terreno a partir de pontos bem definidos na imagem digital e de suas respectivas coordenadas de terreno.

Esses parâmetros de orientação exterior são os elementos que definem a posição e a orientação da câmara segundo um referencial terrestre. Uma fotografia está orientada exteriormente, quando são conhecidas às três coordenadas tridimensionais (XCP , YCP , ZCP) do ponto de onde foi tomada a foto (centro de perspectiva) e três rotações ou ângulos de Euler, representados pelas letras gregas ω (ômega), φ (phi) e κ (Kappa) (COELHO & BRITO, 2007).

FIGURA 1 – SUPERPOSIÇÃO ENTRE AS FOTOGRAFIAS.



Fonte: Adaptado de Tommaselli (1999)

Segundo Sato (2003), a qualidade geométrica de obtenção de imagem aérea é aumentada quando a câmera é dotada de dispositivos de compensação dos ângulos de orientação (ω , ϕ , κ), de Euler. No entanto, atualmente, os sistemas das câmaras aéreas são compostos por um sistema de posicionamento por satélites e o sistema de medição inercial (*Inertial Measurement Unit* – IMU) que permitem o registro automático das coordenadas do centro da foto, inclusive dos dados de rotação da aeronave, aumentando significativamente a produtividade, reduzindo a densidade de pontos de controle bem como as tarefas de ajustamento da aerotriangulação.

Portanto, se tratando de RPA, o seu sistema de câmara aérea realiza automaticamente a correção dos parâmetros das coordenadas. Assim, a aferição correta destes parâmetros se torna fundamental para a obtenção de ortofotos e modelos digitais de elevação com qualidade cartográfica.

Ainda segundo Jensen (2009), a orientação exterior determina a relação matemática entre coordenadas da imagem e dos pontos de controle coletados no terreno. Dessa forma, após a realização da orientação exterior, a informação pode ser usada para executar a aerotriangulação, mesmo que o produto contenha uma significativa produtividade. Ou seja, segundo Andrade (1998) o maior objetivo da fototriangulação é fornecer coordenadas precisas para os pontos necessários para a orientação de modelos foto-

gramétricos para a restituição ou elaboração de ortofotos.

Assim, outro problema recorrente na geração das ortofotos é a falta de análise efetiva do número e distribuição dos pontos de apoio, sendo possível encontrar o padrão de distribuição dos pontos do tipo agrupado, disperso ou aleatório. Segundo Zanetti (2017), um conjunto de pontos de apoio com o padrão de distribuição espacial do tipo agrupado pode comprometer a ortofoto gerada, por isso, o padrão com pontos do tipo disperso é mais adequado. Dessa forma, além da distribuição dos pontos de apoio, é de fundamental importância verificar a quantidade dos mesmos. Quanto mais pontos de controle bem distribuídos na região, utilizados no processamento das fotos, melhor a qualidade posicional da ortofoto gerada.

Segundo Alves Junior, A. P. (2019), pontos de apoio são pontos fotos identificáveis, ou melhor, são objetos e detalhes no terreno que irão aparecer nas imagens aéreas, ou seja, são objetos, alvos ou detalhes no campo, que têm necessariamente que aparecer nas imagens. Esses objetos são utilizados para fazer a relação entre o sistema de coordenadas da imagem com o sistema de coordenadas do terreno. O ponto rastreado em campo, isto é, o sistema de coordenada do terreno está diretamente relacionado com esse mesmo ponto na fotografia, chamada sistema imagem, que permite essa relação. Os pontos de apoio podem ser divididos em dois grupos: os pontos de controle (PC) e os pontos de

verificação (PV).

Portanto, diante dessa tecnologia, este estudo pretende avaliar a acurácia posicional de pontos de projeção cartográfica em ortofotos obtidas de sensor a bordo de aeronaves remotamente pilotadas (RPA) utilizando pontos de apoio. A aeronave utilizada para obter as imagens foi do tipo multi rotor, do modelo *Phantom 4 Pro* da empresa *DJI*. Seu sensor *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS) de 1 polegada de 20 megapixels consegue fotografar e fazer filmes em 4k/60fps ou em modo *burst* (configuração da câmera que permite tirar várias fotos em sequência). Para isso, foi utilizados os parâmetros de acurácia posicional classificados conforme o PEC-PCD (Padrão de exatidão cartográfica — Padrão de exatidão cartográfica de produtos digitais). Conforme tolerâncias estabelecidas pelo Decreto n.º 89.817 de 1984 em conformidade com a Diretoria de Ser-

viço Geográfico do Exército Brasileiro — DSG (2011) e por meio do método de testes de hipóteses. Para tal foram realizados três voos a partir da derivação de altura máxima permitida pela ANAC (2018), sendo, a 80, 100 e 120 metros de altura.

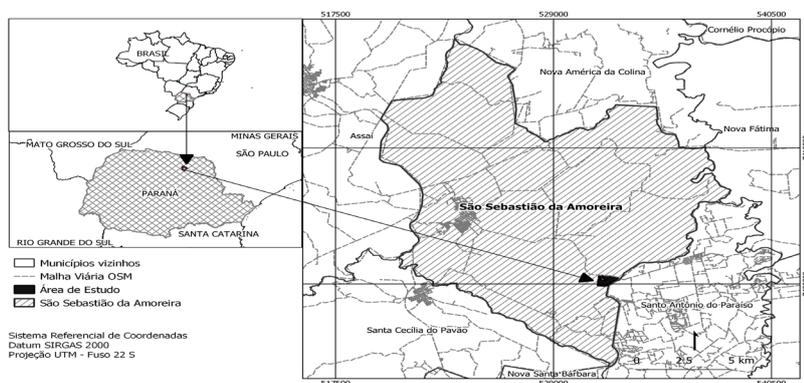
MATERIAL E MÉTODOS

São descritos neste tópico, os materiais e métodos empregados para mensurar a área objeto deste estudo, bem como a avaliação da acurácia dos modelos obtidos por meio do RPA, pontos de apoio e GNSS/RTK, utilizando-se da análise de tendência e precisão.

ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo consiste em um polígono irregular de 8,1 hectares e está localizada nas margens da Rodovia Agostinho Ducci (PR-218) da zona rural do município de São Sebastião da Amoreira no Estado do Paraná, Brasil (Figura 2).

FIGURA 2 – ÁREA DE ESTUDO LOCALIZADA NO MUNICÍPIO DE SÃO SEBASTIÃO DA AMOREIRA, PARANÁ, BRASIL.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

GEOGRAFARCS

Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia e do Departamento de Geografia da UFES

Janeiro-Junho, 2022
ISSN 2175-370

MATERIAIS UTILIZADOS

Foram utilizados os seguintes materiais:

- Receptor GNSS RTK (base ProMark 700, Rover ProMark 500);
- *Software* QGis 2.18 para manipulação dos dados espaciais;
- *Software* fotogramétrico *Agisoft Metashape* para o processamento das fo-

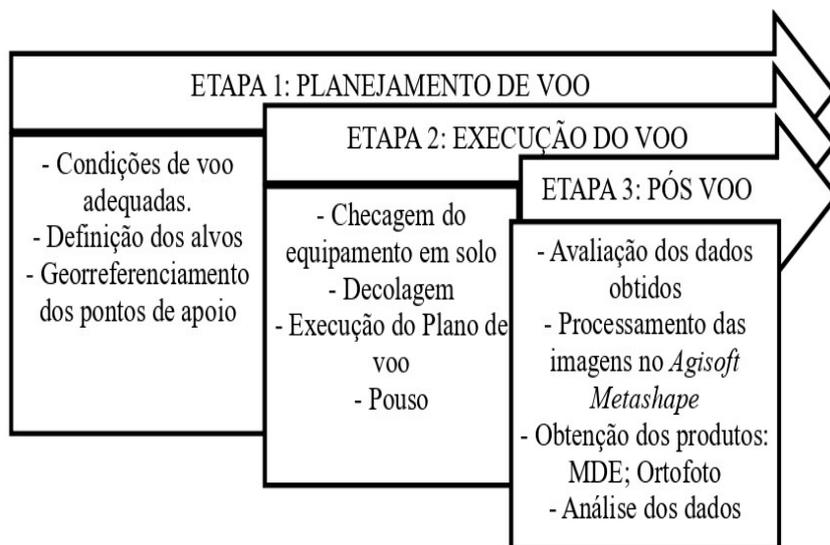
tos;

- A aeronave utilizada para obter as imagens foi do tipo multirrotor, modelo Phantom.

METODOLOGIA

A Figura 3, apresenta de forma ilustrativa, as etapas e os procedimentos metodológicos implementados para atingir os objetivos propostos neste trabalho.

FIGURA 3-FLUXOGRAMA DA METODOLOGIA EMPREGADA PARA GERAÇÃO DA ORTOFOTO.



Fonte: Elaborado pelos autores (2021)

CADASTRO DOS PONTOS DE APOIO

A metodologia utilizada para aquisição e processamento dos dados obtidos pelo RPA, está dividida em três etapas: (1) planejamento de voo; (2) execução do voo; e (3) pós voo. Conforme ilustradas no fluxograma da Figura 3.

A Fotogrametria digital utiliza transformações de sistemas de coordenadas, sendo que cada transformação entre sistemas

necessita de um modelo matemático que representa de forma matemática a conversão entre um sistema de coordenadas e outro (ANDRADE, 1998).

Estas coordenadas usam como referência um elipsóide de revolução, cujos parâmetros que o define é denominado “Datum do sistema geodésico”. Um dos principais sistemas de projeção utilizado é o Universal Transverso de Mercator

(UTM), que usualmente representa suas coordenadas com Leste (E), Norte (N) e Altitude Ortométrica (H) (BAKKER, 1965).

Neste trabalho, o cadastro dos pontos de apoio (PC e PV) foi realizado pelo método de posicionamento RTK (base ProMark 700, Rover ProMark 500) com capacidade de rastreamento de satélites GPS e GLO-NASS.

O método RTK, conhecido também como GPS RTK, é um conjunto de equipamentos eletrônicos

capazes de coletar dados geoespaciais transmitidos por satélites a fim de obter coordenadas precisas, tanto em modo estático (pós-processado) como em modo RTK (*Real Time Kinematic*). No modo (RTK) convencional, os dados de correção são transmitidos por meio de um link de rádio do receptor instalado no vértice de referência ao receptor que percorre os vértices de interesse (campo). É um método muito produtivo devida sua rapidez na fixação do ponto (coordenada). A Tabela 1 mostra as coordenadas dos 16 pontos de apoio coletados em campo.

TABELA 1 – COORDENADAS DOS 16 PONTOS DE APOIO.

Ponto	Longitude	Latitude	Altitude
1	531.831.844	7.400.524.049	727.643
2	531.931.847	7.400.525.417	728.685
3	532.031.849	7.400.526.660	728.599
4	532.131.792	7.400.527.986	725.238
5	531.833.150	7.400.424.084	727.744
6	531.933.140	7.400.425.356	726.446
7	532.033.142	7.400.426.703	724.646
8	532.133.137	7.400.427.991	720.763
9	531.834.405	7.400.324.079	723.208
10	531.934.437	7.400.325.357	719.726
11	532.034.426	7.400.326.682	714.144
12	532.134.407	7.400.327.997	707.128
13	531.835.773	7.400.224.115	718.821
14	531.935.747	7.400.225.420	711.456
15	532.034.420	7.400.216.376	700.725
16	532.135.741	7.400.228.002	690.398

Fonte: Elaborado pelos autores (2021)



Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia e do Departamento de Geografia da UFES

Janeiro-Junho, 2022
ISSN 2175-370

Os pontos de apoio cadastrados tiveram suas coordenadas elipsoidais determinadas e os valores de altitudes elipsoidais (h) convertidos para altitudes ortométricas (H), com o aplicativo MAPGEO2015 (IBGE, 2015). As coordenadas Geodésicas, latitude e longitude, também foram convertidas para o sistema cartesiano de projeção UTM, Fuso 22 do hemisfério Sul. Ou seja, os dados cadastrados em campo foram georreferenciados no Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000, na projeção Universal Transverso de Mercator (UTM) do fuso 22S.

Contudo, para sistematizar a escolha do local onde os pontos de apoio foram cadastrados na área de estudo, alguns cuidados foram observados, como:

- Ponto de acesso facilitado por questão de logística;
- Distribuição dos pontos sobretudo nas áreas próximas das bordas, pois o vento pode influenciar negativamente na etapa de orientação das fotos.

Estes pontos de apoio cadastrados em campo são importantes no processo de triangulação, pois são utilizados para fazer a relação entre o sistema de coordenadas da imagem com o sistema de coordenadas do terreno, como também servem para verificar e atestar a qualidade e a acurácia dos produtos gerados.

A escolha dos 16 pontos de apoio se deve a aerofotogrametria automatizada realizada com RPA por trazer uma boa geometria no bloco fotogramétrico e também pela área de estudo

ser menor a 10 hectares. Assim espera-se que a geometria do bloco com os pontos cadastrados no terreno tenha ainda mais qualidade no teste de acurácia posicional dos produtos.

AQUISIÇÃO DAS FOTOS COM RPA

A aeronave utilizada para obter as imagens foi do tipo multi rotor, do modelo *Phantom 4 Pro* da empresa DJI (Figura 4). Esta aeronave é fabricada pela empresa chinesa DJI Innovations, e equipada com uma câmera de sensor *Complementary Metal Oxide Semiconductor* (CMOS) de 1 polegada de 20 megapixels capaz de fotografar e fazer filmes em 4k/60fps ou em modo *burst* (configuração da câmera que permite tirar várias fotos em sequência). O CMOS é um sensor semiconductor para captação de imagens formado por um circuito integrado que contém uma matriz de capacitores acoplados. Ou seja, é um sensor de carga acoplada com a função de captar as imagens e transformá-las em elétrons (sinais eletromagnéticos) e em *Bits* e *Bytes* por um microprocessador em um processo analógico digital que gera a imagem.

Para a realização do aerolevantamento foram relacionadas as seguintes variáveis: tempo, altura de voo, resolução espacial, sobreposição frontal e lateral e o é o tamanho do pixel no terreno/solo (Tabela 2). A altura dos voos foram de 80, 100 e 120 metros o que levaram a uma resolução estimada em 2,41, 3,00 e 3,50 cm/pixel.

Isto é, a distância de amostra do solo, do termo em inglês: *Ground Sample Distance* (GSD) é a representação do pixel da imagem em unidades de terreno (geralmente em cm).

A delimitação da área e

os parâmetros de *FrontLap* (longitudinal) e *SideLap* (lateral), ou seja, sobreposição frontal e lateral, estão acima dos valores recomendados pela bibliografia para um bom resultado.

FIGURA 4 – RPA UTILIZADO NO AEROLEVANTAMENTO.



Fonte: <http://www.dji.com/>

TABELA 2 – PARÂMETROS UTILIZADOS EM CADA VOO.

voo	Tempo	Imagens	Altura (m)	Resolução (cm/pixels)	Front lap (%)	Sidelap (%)	Gsd (cm/pixel)
1	10'23'	167	80	2,40	75	65	2,41
2	7'49"	107	100	3,00	75	65	3,00
3	6'39"	76	120	3,60	75	65	3,50

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

A regulamentação para a operação de tais equipamentos é dada pela Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) 100 – 40/2017. Esse documento visa esclarecer os procedimentos necessários para realização dos voos de RPA (DECEA, 2017). Segundo a ANAC (2018), sua proposta tem o objetivo de viabilizar as operações das RPA, garantindo que haja segurança para as pessoas. Para tal, as regras estabelecidas concordam com o nível de complexidade e risco envolvido nas operações.

PROCESSAMENTO DE DADOS

Segundo Agisoft LLC (2016), o *Agisoft Metashape* foi desenvolvido pela empresa russa *Agisoft LLC* para criar conteúdo tridimensional a partir de imagens estáticas. Esse programa possui uma interface simples e permite a geração da nuvem de pontos esparsa ou densa, malhas texturizadas tridimensionais e outras representações como as ortofotos, por exemplo.

A metodologia utilizada para aquisição e processamento dos dados obtidos pelo RPA, está dividida em três etapas conforme exemplificado na Figura 3. Uma vez coletados os pontos de apoio, as fotos foram processadas com 10 PC's distribuídos por toda a área de estudo, utilizando o *software Agisoft Metashape*. Os dados cadastrados em campo foram georreferenciados no Sistema Geodésico de Referência SIRGAS 2000, no sistema de projeção Universal Transverso de Mercator

(UTM) do fuso 22S. O processamento de dados no software foi realizado no mesmo Datum e sistema de projeção, em razão dos dados de campo compartilhar deste mesmo referencial.

O *Agisoft Metashape* possui um fluxo automatizado para processar as imagens. Estes foram realizados com base na metodologia apresentada na Tabela 3.

As fotos foram processadas utilizando a configuração (padrão) inicial do *software*. No entanto, apenas na primeira etapa, foi utilizada a opção no *software* de maior precisão (*highest accuracy*) para o alinhamento das fotografias, de modo que o *software* encontre pontos homólogos entre as imagens e permita corresponder, bem como encontrar, a posição da câmera em cada imagem, e refinando em seguida os parâmetros de calibração da câmera. Como resultado, obtém-se uma nuvem de pontos dispersa. As outras etapas seguiram o fluxo padrão do *software* conforme apresentado na (Tabela 3).

AValiação DA ACURÁCIA

Segundo Zanetti (2017), a qualidade dos produtos cartográficos deve ser garantida por leis e normas específicas que apresentem os parâmetros mínimos de qualidade. No caso do Brasil, as normas que norteiam a produção e a análise de qualidade posicional de produtos cartográficos podem ser encontradas no Decreto Lei no 89.817, de 20 de junho de 1984.

A avaliação da acurácia das

ortofotos geradas pelo RPA foi realizada a partir da análise de tendência e precisão dos modelos, sendo os resultados classificados conforme o PEC-PCD, conforme tolerâncias estabelecidas pela Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro — DSG (2011). As classes “B”, “C” e “D” do PEC-PCD, correspondem, em ordem, as classes “A”, “B” e “C” do PEC previstas no Decreto 89.817/84. A Tabela 4 apresenta as tolerâncias utilizadas na avaliação da acurácia posicional utilizando o padrão descrito no Decreto-lei

89.817/ET-ADGV para a escala 1:1000.

Embora, acurácia, precisão e exatidão são tratados como sinônimos, em geral, acurácia pode ser tratada como combinação entre exatidão e precisão. Ou seja, acurácia = exatidão + precisão. Para uma única medição, exatidão é a proximidade de uma medição com um valor considerado verdadeiro (ou de referência) e a precisão não é considerada (já que não sabemos o seu valor), de forma que acurácia e exatidão acabam sendo a mesma coisa.

TABELA 3 – PROCESSAMENTO DAS IMAGENS OBTIDAS COM AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA COM USO DE PONTOS DE APOIO.

<i>Align Photo1</i>	<i>General</i>	<i>Accuracy</i>	<i>Highest</i>
	<i>Advanced</i>	<i>Pair preselection</i> <i>Key point limit</i> <i>Tie point limit</i> <i>Apply masks to</i> <i>Adaptive camera</i> <i>model fitting</i>	<i>Enabled</i> <i>40</i> <i>4</i> <i>None</i> <i>Enabled</i>
<i>Build Dense Cloud²</i>	<i>General</i> <i>Advanced</i>	<i>Quality</i> <i>Depth filtering</i> <i>Reuse depth maps</i>	<i>Medium - Rotina 3</i> <i>Mild</i> <i>Disabled</i>
<i>Build Mesh3</i>	<i>General</i>	<i>Surface type</i> <i>Source data</i> <i>Face count</i>	<i>Arbitrary</i> <i>Dense cloud</i> <i>Low</i>
<i>Build DEM4</i>	<i>Projection</i> <i>Parameters</i>	<i>Geographic</i> <i>Souce data</i> <i>Interpolation</i> <i>Point classes: All</i>	<i>Sirgas2000 / UTM</i> <i>zone 22S</i> <i>Mesh</i> <i>Enabled (default)</i> <i>Disabled</i>
<i>Build Orthomosaic5</i>	<i>Parameters</i>	<i>Surface</i> <i>Blending mode</i> <i>Enable hole filting</i> <i>Pixel size (m)</i> <i>Setup boundaries</i>	<i>DEM</i> <i>Mosaic (default)</i> <i>Enabled</i> <i>Enabled</i> <i>Disabled</i>

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).



Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia e do Departamento de Geografia da UFES

Janeiro-Junho, 2022
ISSN 2175-370

TABELA 4-TOLERÂNCIAS UTILIZADAS PARA AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA CONFORME PEC-PCD (DSG, 2011) E PEC (DECRETO-LEI 89.817/84).

Classe PEC	Classe PEC-PCD	Planimetria		Altimetria	
		PEC (mm)	EP (mm)	PEC (mm)	EP (mm)
	A	0,27	0,17	0,27	0,17
A	B	0,5	0,3	0,5	0,33
B	C	0,8	0,5	0,6	0,4
C	D	1	0,6	0,75	0,5

Fonte: Adaptado de DSG 2011

No entanto, quando um conjunto de medições é realizado, este conjunto apresenta uma componente de erros aleatórios (erros que não podem ser previstos) e uma componente de erros sistemáticos (erros que seguem uma tendência). Neste caso, exatidão está relacionada com o erro entre a média destes valores e o valor tido como referência, enquanto precisão é a dispersão entre os valores de medição. Acurácia é, então, a combinação entre estes dois valores.

Para Monico et al. (2009), a acurácia expressa o grau de proximidade de uma estimativa com o parâmetro para qual ela foi estimada, ou seja, o valor provável encontrado. Dessa forma, a avaliação da acurácia foi realizada considerando esta definição.

Para esta avaliação, foi utilizado o método proposto por Galo e Camargo (1994, p.6) de testes de hipóteses, a partir da análise de tendências (baseada na distribuição *t* de Student, quando é verificada a presença

de erros sistemáticos), e precisão (com base na distribuição Qui-quadrado, para avaliação dos efeitos dos erros aleatórios). Ambos os testes são realizados com nível de significância de $\alpha = 10\%$. O modelo é considerado acurado para uma determinada classe do PEC-PCD, desde que aceite a hipótese nula da avaliação de tendência e precisão realizada com base nas discrepâncias entre as altitudes observadas na ortofoto (h_o) e as altitudes de referência (h_r) dos pontos de verificação (PV) (Equação 1). Estes pontos são selecionados da relação da Tabela 1, pré-sinalizados em campo e georreferenciados com GNSS geodésico, de onde se obtêm as estatísticas como média (Equação 2) e desvio padrão (Equação 3), sendo (n) o número de elementos da amostra.

$$1) \quad \Delta h = (h_o - h_r)$$

2)

$$\overline{\Delta h} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Delta h_i$$

3)

$$s_{\Delta h} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Delta h_i - \overline{\Delta h})^2}$$

ANÁLISE DE TENDÊNCIA

Na análise de tendência são avaliadas as hipóteses: H0: Se $\Delta h = 0$, então h não é tendencioso, contra H1: Se $\Delta h \neq 0$, então h é tendencioso. A partir do número de pontos de referência utilizados na análise, obtém-se o valor limite tabelado $t_{n-1, \alpha/2}$. Se o valor do teste t de Student calculado (Equação 4) for inferior ao tabelado, atendendo a Equação 5, pode-se afirmar que a ortofoto está livre de erros sistemáticos significativos.

4)

$$t_n = \frac{\overline{\Delta h}}{s_{\Delta h}} \sqrt{n}$$

5)

$$|t_{calc}| < t_{n-1, \alpha/2}$$

ANÁLISE DE PRECISÃO

A análise de precisão é realizada utilizando o teste Qui-quadrado, obedecendo aos valores do EP (erro padrão) altimétrico (Tabela 4), estabelecidos na ET-ADGV (DSG, 2011). Para realizar este teste, inicialmente calcula-se o erro padrão esperado (σ_h), conforme a Equação 6. Posteriormente aplica-se um teste de hipótese, comparando-se o desvio-padrão das discrepâncias com o EP esperada

para a classe do PEC-PCD a qual se deseja testar, H0: $S_{\Delta h}^2 = \sigma_h^2$, contra, H1: $S_{\Delta h}^2 > \sigma_h^2$. Para atender a precisão de uma determinada classe (A, B, C ou D) o valor do teste Qui-quadrado calculado X_h^2 , conforme a Equação 7, deve ser inferior ao teste Qui-quadrado tabelado $x_{(n-1, \alpha)}^2$, conforme a Equação 8, permitindo determinar a escala de representação a qual a ortofoto se enquadra. Onde n é o tamanho da amostra s , o desvio padrão das discrepâncias e σ é o EP esperada para uma determinada classe PEC-PCD (Tabela 4).

6)

$$\sigma_h = EP_{alt} \cdot X_{eq. das curvas de nível}$$

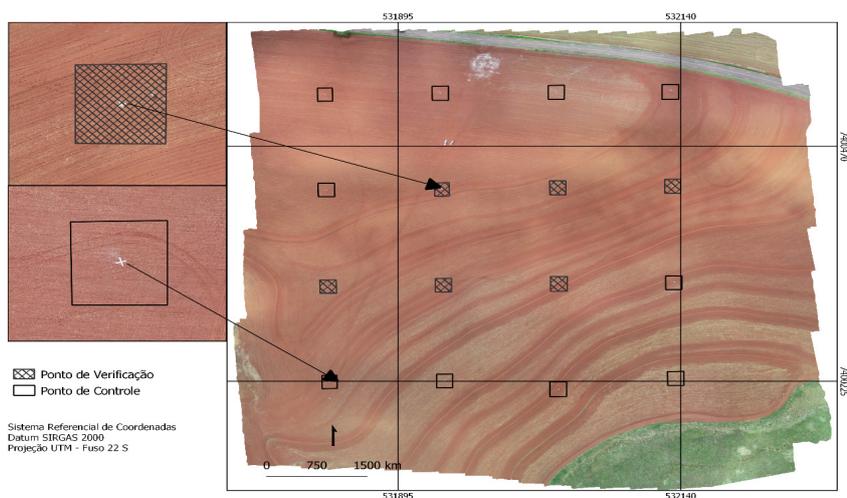
7)

$$X_h^2 = (n-1) \frac{s_{\Delta h}^2}{\alpha_h^2}$$

8)

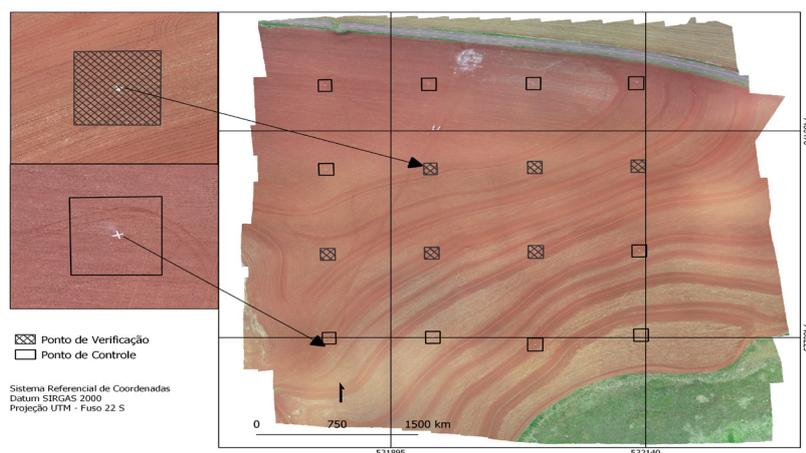
$$X_h^2 \leq x_{(n-1, \alpha)}^2$$

FIGURA 6-VOO 2-ORTOFOTO GERADA A 100M DE ALTURA COM 10 PC'S.



Fonte: Adaptado de DSG 2011

FIGURA 7-VOO 3-ORTOFOTO GERADA A 120M DE ALTURA COM 10 PC'S.



Fonte: Adaptado de DSG 2011

AValiação DA ACURÁCIA

Foram coletados somente 16 pontos de apoio (PCs e PVs), dos quais, foram utilizados 10 PC's para a orientação absoluta do bloco de imagens, e 06 PV's para a avaliação da acurácia dos ortomosaicos. Sendo assim, foram inicialmente calculadas as discrepâncias entre as altimetrias observadas na ortofoto e as cotas dos 6 PV's, obtidas

em campo com GNSS geodésico (Equação 1), bem como sua média e desvio padrão (Equações 2 e 3), sendo os resultados apresentados nas Tabelas 5, 6 e 7.

Conforme os resultados apresentados na Tabela 8, as ortofotos dos três voos estão livres de erros sistemáticos, não apresentando tendências, visto

que a hipótese nula foi aceita pelo teste com o valor de $|t_{\text{calc}}|$ amostral em módulo inferior ao valor de tabela (2,015). Assim vê-se que as ortofotos passaram no teste de precisão na escala 1:1.000 para a Classe A.

O procedimento foi realizado em duas etapas, a primeira emprega uma distribuição *t-Student* destinada à verificação da ausência de tendência (erro sistemático) e a segunda, a distribuição Qui-Quadrado destinada para a verificação da validade do Erro-Padrão (EP) obtido da amostra em relação à precisão requerida para o pro-

duto, EP do PEC-PCD para determinada escala.

Na análise de tendência verificou-se que os valores do *t* amostral calculado (Equação 4) para os dois modelos estavam no intervalo de aceitação da Equação 5, dado pelo valor tabelado de *t* de *Student* para um nível de confiança $(1 - \alpha)$ igual a 90% ($\alpha = 0,10$), que neste estudo de caso, considerando os 06 pontos de verificação utilizados na análise obtém-se o valor limite de $t_{10\%(5)}$ igual a 2,015 indicando que o modelo gerado não apresenta tendência amostral.

TABELA 5 - RESULTADOS QUANTO À QUALIDADE ALTIMÉTRICA DA ORTOFOTO REFERENTE AO VOO 1.

Ponto	ho	hr	Δh
6	726.446.000	726.463.478	0.017478
7	724.646.000	724.680.893	0.034893
8	720.763.000	720.756.115	-0.006885
9	723.208.000	723.211.019	0.003019
10	719.726.000	719.709.039	-0.016961
11	714.144.000	714.106.090	-0.037910
Média Δh			-0,001
Desvio Padrão $S\Delta h$			0,026

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

TABELA 6 - RESULTADOS QUANTO À QUALIDADE ALTIMÉTRICA DA ORTOFOTO REFERENTE AO VOO 2.

Ponto	ho	hr	Δh
6	726.446.000	726.460.130	0.014130
7	724.646.000	724.667.337	0.021337
8	720.763.000	720.757.000	-0.006000
9	723.208.000	723.202.874	-0.005126
10	719.726.000	719.716.162	-0.009838
11	714.144.000	714.132.375	-0.011625
Média Δh			0,001
Desvio Padrão $S\Delta h$			0,014

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

TABELA 7 - RESULTADOS QUANTO À QUALIDADE ALTIMÉTRICA DA ORTOFOTO REFERENTE AO VOO 3.

Ponto	ho	hr	Δh
6	726.446.000	726.479.886	0.033886
7	724.646.000	724.705.078	0.059078
8	720.763.000	720.771.842	0.008842
9	723.208.000	723.202.904	-0.005096
10	719.726.000	719.707.946	-0.018054
11	714.144.000	714.109.657	-0.034343
Média Δh			0,007
Desvio Padrão $S\Delta h$			0,034

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

TABELA 8 - RESULTADO DA AVALIAÇÃO DA ACURÁCIA - TESTE DE TENDÊNCIA E PRECISÃO PARA A ESCALA 1:1.000 CONFORME DESCRITO NO DECRETO-LEI Nº 89.817.

<i>Classe A</i>			
	<i>voo 1</i>	<i>Voo 2</i>	<i>Voo 3</i>
<i>n</i> <i>(Amostral)</i>	6 pontos	6 pontos	6 pontos
<i>Média Δh</i>	-0,001	0,001	0,007
<i>Desvio Padrão $S\Delta h$</i>	0,026	0,014	0,034
<i>EP - PEC</i>	0,17	0,17	0,17
<i>Teste de Tendência</i>			
<i>t10%(5)</i>	2,015	2,015	2,015
<i>tcalc</i>	-0,10	0,09	0,50
<i>Análise</i>	<i>tcalc < t(tabela)</i> Sem tendência	<i>tcalc < t(tabela)</i> Sem tendência	<i>tcalc < t(tabela)</i> Sem tendência
<i>Teste de Precisão</i>			
<i>X²10% (5)</i>	9,24	9,24	9,24
<i>X²calc</i>	0,12	0,03	0,2
<i>Análise</i>	<i>X²calc < X²(tabela)</i> Atende	<i>X²calc < X²(tabela)</i> Atende	<i>X²calc < X²(tabela)</i> Atende

Fonte: Elaborado pelos autores (2021).

No tocante a precisão relativa, as ortofotos geradas a partir dos dados obtidos pelo RPA, obtiveram precisão altimétrica compatível com a Classe A do PEC-PCD para a escala 1:1000. Para tanto, foram consideradas os limites tabelados de x^2 de

9,24 para uma amostra (n) de tamanho 06, com nível de significância de 10% e 5 graus de liberdade (Tabela 8).

CONCLUSÃO

Considerando que os voos foram realizados em uma janela



Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia e do Departamento de Geografia da UFES

Janeiro-Junho, 2022
ISSN 2175-370

de tempo de cerca de uma hora e que a geometria das constelações dos satélites observados pôde promover a ocorrência de tendência nas posições cadastradas para cada voo, quando analisada de forma isolada, a análise de tendência apresentou resultados compatíveis com o esperado para as categorias de produtos gerados.

A pesquisa aborda a qualidade das ortofotos produzidas de pontos de projeção cartográfica obtidas de sensor a bordo de RPA, utilizando rotinas automatizadas e com pontos de apoio (PV e PC). As avaliações da acurácia posicional foram baseadas em comparações entre os valores sobre o produto a ser testado e material de fonte mais acurado. Por isso, a não utilização de pontos de apoio, assim como também a alteração de rotinas de processamento e softwares e, do equipamento, podem produzir valores diferentes daqueles aqui observados.

A geometria do bloco com os pontos cadastrados no terreno teve uma excelente qualidade no teste de acurácia posicional dos produtos gerados, mesmo utilizando 16 pontos de apoio para uma área menor que 10 hectares. Para uma área maior recomenda-se utilizar a norma ASPRS de 2014, que especifica a quantidade de 20 de pontos de apoio para uma área de até 500 km².

Portanto, os resultados apresentados indicam que a geração de modelos altimétricos e planimétricos por fotogrametria digital utilizando um bom sensor a bordo de RPA, mais as técnicas de ajustamento dos

pontos de projeção cartográfica realizada com pontos de apoio implementados com o *software Agisfot Metashape*, são produtos com precisão e confiabilidade que atende os padrões de precisão e acurácia do PEC-PCD classe A para escalas 1:1000. O PEC-PCD baseia-se no cálculo da precisão e acurácia posicional, que estão fortemente vinculados ao método de determinação dos pontos de controle e de verificação.

Diante dos resultados expostos, pode-se perceber que o objetivo de analisar a acurácia posicional de pontos de projeção cartográfica em ortofotos obtidas de sensor a bordo de RPA, a partir dos pontos de verificação foi alcançado. Contudo, por existirem inúmeras categorias de sensores, esta afirmação vale somente para o sensor utilizado neste estudo, ou seja, o sensor (CMOS) de 1 polegada de 20 megapixels. Dessa forma, verificou-se que a metodologia proposta permitiu avaliação da acuracidade conforme o padrão descrito no Decreto-lei 89.817/ET-ADGV, e consequentemente a precisão final das ortofotos geradas. Mesmo sendo uma técnica já validada em outras pesquisas, os produtos gerados com as imagens dos três voos coletadas pelo RPA permitem a identificação de várias informações com qualidade e acurácia, podendo ser empregadas em várias áreas de estudo, como, por exemplo, no auxílio da atualização cadastral referente às propriedades tributáveis, os lotes (IPTU), no processo de extração da informação geográfica, entre outras.

A pesquisa bibliográfica e adoção de processos estatísticos direcionados para pequenas amostras não invalida a aplicação em grandes amostras, o que mostra a consolidação correta da metodologia voltada para a padronização de uma atividade corporativa diversa. É válido ressaltar que a precisão encontrada na aplicação dos testes amostrais a partir do PEC-PCD difere do calculado pelo Ground Sample Distance (GSD), isto é, distância da amostra do solo, dado que esta última determina os valores estabelecidos em relação ao pixel do produto cartográfico e utiliza parâmetros diferentes na determinação dos atributos. Diferentemente do cálculo da acurácia posicional, que se baseia no método de levantamento estabelecido (GPS de navegação) e na realização do controle de qualidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGISOFT LLC. **Agisoft PhotoScan User Manual**. Professional Edition, Version 1.2, p. 37, 2016. Disponível em: <www.agisoft.ru>. Acesso em: 20 fev. 2019

ALVES, JUNIOR, A. P. Avaliação da acurácia do georreferenciamento em pontos de controle de aerolevantamento realizado com aeronave remotamente pilotada - RPA. **XIII ENANPEGE**, São Paulo, 2019. Disponível em: <http://www.enanpege.ggf.br/2019/resources/anais/8/1562632863_ARQUIVO_ARTIGOENAMPEGE-AGOSTINHO.pdf>. Acesso em: 15 dez. 2019.

ANAC - AGENCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **Regras da ANAC para uso de drones**. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/noticias/2017/regras-da-anac-para-uso-de-drones-entram-em-vigor/release_drone.pdf/view>. Acesso em 20 fev. 2019.

ANAC - AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL. **DRO- NES - Páginas Temáticas – Drone**. ANAC, 2018. Disponível em: <<http://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/drones>>. Acesso em: 20 fev. 2019.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998.

BAKKER, M. P. R. **Cartografia noções básicas**. Rio de Janeiro: 1965. 242 p.

COELHO, L;BRITO, J. N. **Fotogrametria digital**. Ed. UERJ. 2007. 196 p.

COLOMINA, I.; MOLNA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review. **ISPRS Journal of**



Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia e do Departamento de Geografia da UFES

Janeiro-Junho, 2022
ISSN 2175-370

Photogrammetry and Remote Sensing, v.92, p.79-97, 2014.

DECEA – **DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO**. Portaria DECEA Nº 282/DGCEA, de 22 de dezembro de 2016. Aprova a reedição da ICA 100-40, que trata dos “Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro”. Publicado no BCA, Brasília, DF, 02 fev. 2017.

DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO (DSG). **Especificação técnica para a aquisição de dados geospaciais vetoriais (ET-ADGV)**. Ministério da Defesa, Exército Brasileiro, Departamento de Ciência e Tecnologia. Brasília – DF, 2ª edição, 2011

EXÉRCITO BRASILEIRO. DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA. EB80-N-72.003: **norma da especificação técnica para aquisição de dados geospaciais vetoriais de defesa da força terrestre (ET-ADVDF DEFESA F Ter)**. 2.ed. Brasília, 2016.

GALO, M.; CAMARGO, P. O. Utilização do GPS no controle de qualidade de cartas. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO**, p. 41-48, 1994.

GRIPP JR, Joel. **Ortorretificação de imagens de alta resolução para aplicação no cadastro técnico rural e mapeamento de área de preservação permanente e reservas legais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa. 2009.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **O novo modelo de ondulação geoidal do Brasil: MAPGEO2015**. Rio de Janeiro, RJ, nov. 2015. Disponível em: < ftp://geoftp.ibge.gov.br/modelos_digitais_de_superficie/modelo_de_ondulacao_geoidal/cartograma/rel_mapgeo2015.pdf >. Acesso em: 20 fev. 2019

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. 2ed. São José dos Campos: Parêntese, 2009, 604 p.

MONICO, J. F. G.; PÓZ, A. P. D.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. Acurácia e precisão: revendo os conceitos de forma acurada. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 15, n. 3, p. 469–483, 2009.

SATO, S.S. **Sistema de controle de qualidade dos processos fotogramétricos digitais para produção de dados espaciais**. 2003. 229 f. Tese (Doutorado em Engenharia Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

SILVA, D. C.; TOONSTRA, G. W. A.; SOUZA, H. L. S.; PE-

REIRA, T. A. J. 2014. **Qualidade de Ortomosaicos de Imagens de Vant processados Com os Softwares APS, PIX4D E PHOTOSCAN**. In: Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, 5, Recife-PE

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Básica**. Presidente Prudente: Departamento de Cartografia, 1999.

ZANETTI, J. **Influência do Número e Distribuição de Pontos de Controle em Ortofotos Geradas a Partir de um Levantamento por Vant**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 84 p. Viçosa, 2017.

GEOGRAFARCS 

Revista do Programa de
Pós-Graduação em Geografia e
do Departamento de Geografia
da UFES

Janeiro-Junho, 2022
ISSN 2175-370