

ACURÁCIA PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA DE PRODUTOS FOTOGRAMÉTRICOS OBTIDOS POR RPA PARA APOIO AO CADASTRO DE UM CAMPUS UNIVERSITÁRIO

PLANIMETRIC AND VERTICAL ACCURACY OF RPA-DERIVED PHOTOGRAMMETRIC PRODUCTS FOR SUPPORTING THE CADASTRAL MAPPING OF A UNIVERSITY CAMPUS

EXACTITUD PLANIMÉTRICA Y ALTIMÉTRICA DE PRODUCTOS FOTOGRAMÉTRICOS OBTENIDOS MEDIANTE RPA PARA APOYAR EL CATASTRO DE UN CAMPUS UNIVERSITARIO

Igor Luiz dos Santos Rocha¹, Isabella Silveira Santos², Vinícius Rodrigues dos Santos³, Daniel Ramos dos Santos⁴, Niel Nascimento Teixeira⁵, Diego Simeone Araújo dos Santos Araújo⁶

DOI: 10.54899/dcs.v23i93.6293

Recibido: 22/07/2026 | Aceptado: 23/07/2026 | Publicación en línea: 10/08/2026.

RESUMO

A produção de bases cartográficas atualizadas é fundamental para o planejamento, a gestão patrimonial e a execução de intervenções de engenharia em campi universitários. Este estudo avaliou a acurácia planimétrica e altimétrica de produtos fotogramétricos obtidos por Aeronave Remotamente Pilotada (RPA), visando verificar sua aplicabilidade como apoio ao cadastro do Campus Soane Nazaré de Andrade, da Universidade Estadual de Santa Cruz, em Ilhéus, Bahia. O levantamento abrangeu aproximadamente 32,60 ha e foi realizado com uma RPA DJI Mavic 3 Enterprise, a 120 m acima do terreno, com sobreposição frontal de 70%, lateral de 80% e velocidade de voo de 15 m/s. Para o apoio e a validação do bloco fotogramétrico, foram implantados 11 pontos de controle e três pontos independentes de verificação, determinados com receptor GNSS Trimble R12i pelo método RTK. As imagens foram processadas no software Agisoft Metashape para geração do ortomosaico, do Modelo Digital de Superfície e do Modelo Digital do Terreno. A qualidade posicional foi analisada por meio das discrepâncias nas componentes Este, Norte e altitude, empregando-se os testes de Shapiro-Wilk, t de Student e qui-quadrado, em conformidade com os critérios do PEC-PCD. Não foram encontradas evidências estatísticas suficientes de tendência significativa nas componentes avaliadas. Conforme a

¹ Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Itabuna, Bahia, Brasil. E-mail: igorlurocha@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-5535-2213>

² Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), Itabuna, Bahia, Brasil. E-mail: isabellasilveira@gfe.ufsb.edu.br Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-5540-0772>

³ Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), Itabuna, Bahia, Brasil. E-mail: e.viniciusrs@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-2857-1115>

⁴ Mestrando em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), Almadina, Bahia, Brasil. E-mail: daniel.ramos@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5214-9101>

⁵ Doutor em Ciências Geodésicas pela Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Itabuna, Bahia, Brasil. E-mail: nnteixeira@uesc.br Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-3047-8932>

⁶ Graduando em Agronomia pela Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), Ilhéus, Bahia, Brasil. E-mail: diego.simeone001@gmail.com Orcid: <https://orcid.org/0009-0005-5638-0502>

classificação apresentada, os produtos atingiram a Classe C para a planimetria e a Classe B para a altimetria, na escala 1:1.000. Os resultados indicam potencial de aplicação da aerofotogrametria com RPA no apoio à gestão territorial universitária, embora a reduzida quantidade de pontos de verificação limite a robustez estatística e a generalização das conclusões.

Palavras-chave: Aeronave Remotamente Pilotada. Acurácia Posicional. Levantamento Cadastral. Fotogrametria. PEC-PCD.

ABSTRACT

The production of up-to-date cartographic databases is essential for planning, asset management, and the implementation of engineering interventions on university campuses. This study assessed the planimetric and vertical accuracy of photogrammetric products obtained using a Remotely Piloted Aircraft (RPA), with the aim of verifying their applicability in supporting the cadastral mapping of the Soane Nazaré de Andrade Campus of the State University of Santa Cruz, in Ilhéus, Bahia, Brazil. The survey covered approximately 32.60 ha and was conducted using a DJI Mavic 3 Enterprise RPA flying at 120 m above ground level, with 70% forward overlap, 80% side overlap, and a flight speed of 15 m/s. To support and validate the photogrammetric block, 11 ground control points and three independent checkpoints were established using a Trimble R12i GNSS receiver operating in RTK mode. The images were processed in Agisoft Metashape to generate an orthomosaic, a Digital Surface Model, and a Digital Terrain Model. Positional quality was assessed based on discrepancies in the Easting, Northing, and height components using the Shapiro–Wilk test, Student’s t-test, and the chi-square test, in accordance with PEC-PCD criteria. No statistically significant evidence of systematic bias was found in the assessed components. According to the reported classification, the products achieved Class C for planimetry and Class B for altimetry at a scale of 1:1,000. The results indicate the potential of RPA-based photogrammetry to support university land and asset management, although the limited number of checkpoints restricts the statistical robustness and generalizability of the conclusions.

Keywords: Remotely Piloted Aircraft. Positional Accuracy. Cadastral Surveying. Photogrammetry. PEC-PCD.

RESUMEN

La producción de bases cartográficas actualizadas es fundamental para la planificación, la gestión patrimonial y la ejecución de intervenciones de ingeniería en campus universitarios. Este estudio evaluó la exactitud planimétrica y altimétrica de productos fotogramétricos obtenidos mediante una Aeronave Pilotada Remotamente (RPA), con el objetivo de verificar su aplicabilidad como apoyo al catastro del Campus Soane Nazaré de Andrade de la Universidad Estatal de Santa Cruz, en Ilhéus, estado de Bahía, Brasil. El levantamiento abarcó aproximadamente 32,60 ha y se realizó con una RPA DJI Mavic 3 Enterprise, a 120 m sobre el nivel del terreno, con un solapamiento longitudinal del 70 %, lateral del 80 % y una velocidad de vuelo de 15 m/s. Para el apoyo y la validación del bloque fotogramétrico, se establecieron 11 puntos de control terrestre y tres puntos independientes de verificación, determinados mediante un receptor GNSS Trimble R12i operando en modo RTK. Las imágenes se procesaron en Agisoft Metashape para generar un ortomosaico, un Modelo Digital de Superficie y un Modelo Digital del Terreno. La calidad posicional se evaluó a partir de las discrepancias en las componentes Este, Norte y altura, mediante la prueba de Shapiro-Wilk, la prueba t de Student y la prueba de chi-cuadrado, de

conformidad con los criterios del PEC-PCD. No se encontraron evidencias estadísticas significativas de sesgo sistemático en las componentes evaluadas. Según la clasificación presentada, los productos alcanzaron la Clase C para la planimetría y la Clase B para la altimetría, a escala 1:1.000. Los resultados indican el potencial de la fotogrametría basada en RPA para apoyar la gestión territorial y patrimonial universitaria, aunque el reducido número de puntos de verificación limita la solidez estadística y la generalización de las conclusiones.

Palabras clave: Aeronave Pilotada Remotamente. Exactitud Posicional. Levantamiento Catastral. Fotogrametría. PEC-PCD.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución- NoComercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento das geotecnologias tem transformado significativamente a forma de aquisição e representação de informações espaciais. Entre os avanços mais expressivos das últimas décadas destaca-se a fotogrametria digital associada às Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAs), tecnologia que permite a obtenção de produtos cartográficos de alta resolução com rapidez, menor custo operacional e reduzida necessidade de equipes de campo (Colomina e Molina, 2014; Teixeira *et al.*, 2024). Em função dessas características, o emprego de RPAs tem se expandido para diferentes áreas da engenharia, agricultura, planejamento urbano, monitoramento ambiental e gestão patrimonial (Eisenbeiss, 2009; Nex e Remondino, 2014).

Nos levantamentos cadastrais, essa tecnologia possibilita a geração de ortofotomosaicos, modelos digitais de superfície, modelos digitais de terreno, modelos digitais de elevação, nuvens densas de pontos e curvas de nível com elevado nível de detalhamento. Esses produtos representam importante alternativa aos métodos topográficos convencionais, principalmente em áreas que demandam atualização rápida das informações espaciais (Teixeira, Cruz Júnior e Galvão, 2025). Entretanto, a elevada resolução das imagens não garante, por si só, a qualidade geométrica dos produtos gerados, tornando indispensável a avaliação de sua acurácia posicional antes de sua utilização em projetos de engenharia.

A qualidade de um produto cartográfico está diretamente relacionada à proximidade entre as coordenadas representadas e sua posição real no terreno. Embora pesquisas recentes demonstrem que levantamentos realizados com RPAs podem atingir elevados níveis de precisão, também evidenciam a ocorrência de erros sistemáticos que podem comprometer aplicações que

exigem maior rigor geométrico (Amaral *et al.*, 2025; Santos *et al.*, 2025). Dessa forma, a validação estatística da acurácia torna-se etapa fundamental para garantir a confiabilidade dos produtos cartográficos.

No Brasil, essa avaliação é regulamentada pelo Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, que institui o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), posteriormente complementado pela Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG), que institui o PEC-PCD para produtos digitais, distinta da Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV), a qual disciplina apenas os critérios de aquisição dos dados. É a ET-CQDG que estabelece os procedimentos para análise de tendência, de precisão e de Erro Quadrático Médio (EQM), permitindo verificar se os produtos cartográficos atendem aos requisitos de qualidade exigidos para diferentes escalas e aplicações (DSG, 2016a; CONCAR, 2011; Teixeira *et al.*, 2024).

Apesar do crescimento das pesquisas envolvendo RPAs, a maior parte dos estudos nacionais concentra-se em aplicações voltadas ao monitoramento ambiental, áreas costeiras e mapeamento urbano. Ainda são limitadas as investigações que avaliam a qualidade geométrica de produtos cartográficos destinados ao levantamento cadastral de campi universitários, ambientes que apresentam elevada diversidade de edificações, vias, áreas verdes e infraestrutura, exigindo bases cartográficas confiáveis para subsidiar atividades de planejamento, gestão patrimonial e futuros projetos de engenharia.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar a acurácia posicional planimétrica do ortomosaico e altimétrica dos modelos digitais produzidos a partir de imagens obtidas por Aeronave Remotamente Pilotada (RPA), em voo realizado a 120 m acima do terreno, no Campus Soane Nazaré de Andrade da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC). A avaliação é conduzida mediante a comparação das coordenadas extraídas dos produtos fotogramétricos com aquelas determinadas em pontos independentes de verificação, observando-se os critérios estabelecidos pelo Decreto nº 89.817/1984 e pelo Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), em articulação com as especificações técnicas brasileiras aplicáveis ao controle de qualidade de dados geoespaciais. Busca-se determinar o enquadramento dos produtos nas classes de acurácia correspondentes à escala analisada, bem como identificar suas potencialidades e limitações para apoiar a atualização da base cartográfica, a gestão territorial e patrimonial e o planejamento da infraestrutura universitária, sem pressupor sua utilização isolada para a definição jurídica ou material dos limites cadastrais.

REFERENCIAL TEÓRICO

Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA)

RPA é a sigla para *Remotely Piloted Aircraft* - aeronave capaz de voo autônomo ou assistido sem tripulação a bordo, operada a partir de uma estação de pilotagem remota (ANAC, 2023). É importante distinguir esse termo de seus sinônimos populares: *drone* é a designação corrente na linguagem cotidiana e comercial, enquanto VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) foi a nomenclatura mais utilizada na literatura científica brasileira antes da padronização promovida pela Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) e pelo Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), que adotaram RPA - e sua variante RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), quando se inclui a estação de controle em solo - como termos técnicos oficiais (Munaretto, 2020).

Para fins regulatórios, a ANAC segmenta as RPA em três classes de acordo com o Peso Máximo de Decolagem (PMD) - grandeza que soma o peso da estrutura, da bateria ou combustível e de eventual carga útil transportada: Classe 1 ($PMD > 150 \text{ kg}$), Classe 2 ($150 \text{ kg} \geq PMD > 25 \text{ kg}$) e Classe 3 ($PMD \leq 25 \text{ kg}$) (ANAC, 2023). Essa última classe é preponderante no mercado de mapeamento topográfico e cartográfico, tanto pelo menor custo de aquisição e operação quanto pela dispensa de licença de piloto em voos VLOS realizados abaixo de 400 pés de altura.

No que se refere à configuração da aeronave, distinguem-se essencialmente as plataformas de asa fixa e os multirrotores (Munaretto, 2020). Multirrotores decolam e pousam na vertical, o que os torna praticamente a única opção viável em áreas confinadas, com obstáculos verticais próximos e geometria irregular, como é o caso de pátios internos, arruamentos estreitos e edificações contíguas em um campus universitário. Já as aeronaves de asa fixa compensam a maior autonomia de voo com a exigência de pista ou espaço livre considerável para decolagem e pouso, o que restringe seu uso a áreas mais abertas. Independentemente da plataforma, a acurácia geométrica do produto final depende da combinação entre o tipo de sensor embarcado (câmeras RGB convencionais, multiespectrais ou receptores GNSS integrados) e dos parâmetros efetivamente empregados durante a execução do voo (Pedreira *et al.*, 2020).

A regulamentação também define, com base na linha de visada (*line of sight*) entre piloto e aeronave, três regimes operacionais: VLOS (*Visual Line-of-Sight*), em que o piloto acompanha

visualmente a aeronave sem qualquer auxílio óptico; EVLOS (*Extended Visual Line-of-Sight*), em que esse acompanhamento é feito com lentes ou com o apoio de observadores em campo; e BVLOS (*Beyond Visual Line-of-Sight*), quando a aeronave opera além do alcance visual do piloto (ANAC, 2023). O Regulamento Brasileiro da Aviação Civil Especial (RBAC-E) nº 94 permite que RPA de até 25 kg voem em regime VLOS até 400 pés (≈ 120 m) de altura sem autorização prévia específica, desde que respeitada a distância mínima de 5 km de aeródromos; ultrapassar essa altitude, ou operar em BVLOS, exige Certificado de Aeronavegabilidade Especial (CAER) emitido pela própria ANAC (ANAC, 2017; DroneShow, 2022). Por essa razão, 120 m tende a ser adotado, na prática, como teto operacional em levantamentos de mapeamento com RPA sem necessidade de licenciamento adicional - parâmetro que, como discutido na seção 2.8, tem impacto direto sobre a acurácia final do produto cartográfico gerado. A Figura 1 resume esses requisitos regulatórios por classe de RPA.

Figura 1

Resumo da regulamentação da ANAC para as classes de RPA

Resumo da Regulamentação da ANAC				
	RPA Classe 1	RPA Classe 2	RPA Classe 3	Aeromodelos
Registro da aeronave?	Sim	Sim	BVLOS: Sim VLOS: Sim ¹	Sim ¹
Aprovação ou autorização do projeto?	Sim	Sim ²	Apenas BVLOS ou acima de 400 pés ²	Não
Limite de idade para operação?	Sim	Sim	Sim	Não
Certificado médico?	Sim	Sim	Não	Não
Licença e habilitação?	Sim	Sim	Apenas para operações acima de 400 pés	Apenas para operações acima de 400 pés
Local de operação	A distância da aeronave não tripulada NÃO poderá ser inferior a 30 metros horizontais de pessoas não envolvidas e não anuentes com a operação. O limite de 30 metros não precisa ser observado caso haja uma barreira mecânica suficientemente forte para isolar e proteger as pessoas não envolvidas e não anuentes. Esse limite não é aplicável para operações por órgão de segurança pública, de polícia, de fiscalização tributária e aduaneira, de combate a vetores de transmissão de doenças, de defesa civil e/ou do corpo de bombeiros, ou operador a serviço de um destes.			

Fonte: ANAC (2017)

Posicionamento GNSS Aplicado a Levantamentos com RPA

O georreferenciamento de qualquer levantamento aerofotogramétrico depende, em última instância, de tecnologia de posicionamento por satélite. Monico (2008), em obra de referência sobre o tema no Brasil, descreve o Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) como o conjunto de constelações - GPS, GLONASS, Galileo e sistemas correlatos - cuja combinação de observáveis de código e fase permite determinar coordenadas com exatidão que varia de metros a milímetros, a depender do método de processamento adotado. Três estratégias são, na prática, as mais relevantes para levantamentos com RPA.

No posicionamento estático relativo, em que dois ou mais receptores rastreiam simultaneamente os mesmos satélites por um intervalo prolongado, sendo os dados posteriormente processados em escritório, permanece o método de referência para a materialização de Pontos de Controle e de Verificação, por oferecer a maior exatidão entre as três estratégias. O posicionamento RTK (*Real Time Kinematic*), por sua vez, corrige em tempo real a posição do receptor móvel a partir de uma estação-base fixa (própria ou disponibilizada por rede de correção via protocolo NTRIP), o que viabiliza tanto o levantamento ágil de pontos de apoio em campo quanto quando o receptor é embarcado na própria aeronave, fazendo o georreferenciamento direto de cada fotografia no instante de sua exposição. Por fim, o posicionamento por ponto preciso, ou PPP (*Precise Point Positioning*), dispensa estação de referência local. Neste método, as observações de um único receptor são processadas por serviços online, como o IBGE-PPP, no caso brasileiro; a partir de órbitas e correções de relógio de alta precisão disponibilizadas por agências internacionais.

A crescente adoção de sistemas RTK/PPK embarcados nas próprias RPA vem reduzindo a dependência de uma malha extensa de Pontos de Controle terrestres, já que a posição do centro perspectivo de cada imagem passa a ser conhecida com precisão centimétrica no instante da tomada. Ainda assim, a literatura recomenda manter Pontos de Verificação independentes do processamento, determinados por método de exatidão superior à do próprio levantamento, como forma de validar empiricamente a acurácia do produto final, qualquer que seja a tecnologia de posicionamento embarcada na aeronave (Luhmann *et al.*, 2019).

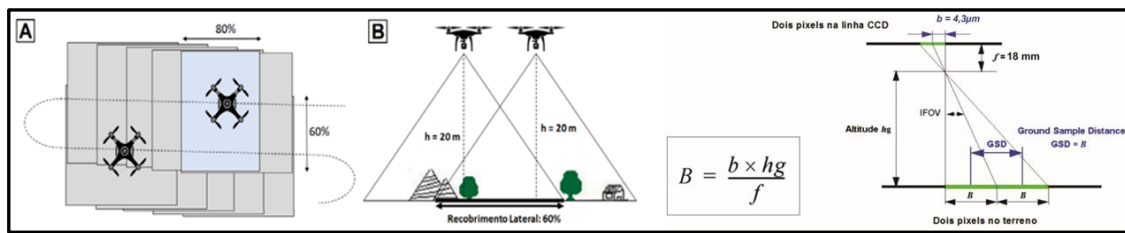
Fotogrametria com RPA

A fotogrametria (ciência que extrai medições confiáveis a partir de fotografias) atravessou quatro fases historicamente reconhecidas: uma fase pioneira, contemporânea da própria invenção da fotografia no século XIX; uma fase analógica, apoiada em câmaras métricas e instrumentos óptico-mecânicos; uma fase analítica, em que o processamento passou a ser computacional; e a fase digital, iniciada por volta de 1990 e ainda vigente, na qual a imagem digital se tornou a matéria-prima central e passou a permitir a geração automatizada de ortofotos, mosaicos e modelos de superfície (McGlone, 2004; Brito e Coelho Filho, 2007). O emprego de RPA nessa última fase é impulsionado, sobretudo, pela combinação entre resolução espacial elevada, agilidade de aquisição e baixo custo operacional frente aos levantamentos topográficos convencionais: um trabalho de campo com estação total que exigiria cerca de cinco horas pode, em condições favoráveis, ser executado em aproximadamente uma hora com RPA, com ganho de produtividade da ordem de 80% (Teixeira *et al.*, 2022).

Essa produtividade, contudo, não dispensa planejamento técnico. Todo levantamento aerofotogramétrico com RPA deve ser precedido de um plano de voo (ou missão), definido a partir de informações cartográficas prévias da área de interesse e estruturado em faixas de imagens com sobreposição controlada - recomendando-se tipicamente entre 60% e 70% de sobreposição lateral e entre 70% e 80% de sobreposição longitudinal (Silva *et al.*, 2022). Essa sobreposição não é um mero parâmetro de qualidade estética: é ela que garante que cada ponto do terreno seja fotografado a partir de múltiplas posições e ângulos da câmera, condição geométrica indispensável para que o algoritmo de *Structure from Motion* (SfM) - hoje o núcleo do processamento fotogramétrico digital - consiga triangular a posição tridimensional dos pontos homólogos identificados entre imagens consecutivas (Guimarães *et al.*, 2025). A Figura 2 ilustra esse princípio: no painel A, o RPA percorre faixas de voo paralelas registrando fotografias com sobreposição lateral e frontal entre si; no painel B, um mesmo ponto do terreno é capturado por diferentes posições da câmera ao longo da trajetória, o que possibilita a reconstrução estereoscópica da cena.

Figura 2

Sobreposição entre fotografias no voo fotogramétrico com RPA.



Fonte: Adaptado de Menezes *et al.* (2019).

Entre os parâmetros de planejamento, o *Ground Sample Distance* (GSD) - a porção do terreno representada por um único pixel da imagem, normalmente expressa em centímetros - é talvez o mais determinante, por condicionar diretamente o nível de detalhamento do produto final. Sua relação com a altura de voo é dada por:

$$B = \frac{b \cdot h_g}{f} \quad (1)$$

em que

B corresponde ao GSD, b ao tamanho físico do pixel no sensor, h_g à altura de voo e f à distância focal da lente utilizada (Bernardo, 2021). Da equação decorre uma relação inversamente proporcional entre altura de voo e nível de detalhe: voos mais altos produzem GSD maior (menos detalhes, porém maior cobertura por imagem e menor tempo de voo), enquanto voos mais baixos produzem GSD menor (mais detalhe, à custa de maior número de fotografias e de tempo de processamento).

Do ponto de vista geométrico, a fotogrametria com RPA trabalha com três sistemas de coordenadas simultâneos: um sistema externo à câmera, o espaço-objeto, expresso em três eixos métricos (X, Y, Z) e referenciado a um ponto arbitrário do próprio terreno; e dois sistemas internos ao espaço-imagem, um em unidades de pixel, com origem no canto superior esquerdo do quadro (u, v), e outro em milímetros, com origem no centro geométrico da imagem (x, y, z) (Silva *et al.*, 2022). É a relação entre esses três sistemas - obtida por meio da orientação interior, que descreve os parâmetros intrínsecos da câmera, e da orientação exterior, que descreve a posição e a atitude da câmera no instante de cada exposição - que a aerotriangulação resolve, permitindo transformar um conjunto de fotografias individuais em um produto georreferenciado e metricamente confiável.

Pontos de Apoio e Pontos de Verificação

Para que um levantamento com RPA gere produtos cartográficos confiáveis, é necessário estabelecer em campo dois conjuntos distintos de pontos foto identificáveis e reconhecíveis nas imagens obtidas durante o voo, ambos posicionados com GNSS de alta precisão: os Pontos de Controle (equivalentes aos Ground Control Points, ou GCPs, da literatura internacional) e os Pontos de Verificação.

Os Pontos de Controle entram no processamento fotogramétrico como restrições geométricas, através do ajuste e georreferenciamento do bloco de imagens, corrigindo a posição do modelo para as coordenadas reais observadas em campo. Os Pontos de Verificação, ao contrário, são deliberadamente mantidos fora do processamento e usados apenas na etapa final de avaliação, funcionando como uma amostra externa e independente para testar a qualidade do produto já pronto (Alves Junior e Gomes, 2022; Luhmann *et al.*, 2019). Essa separação entre pontos de ajuste e pontos de teste é também exigida por normas internacionais como as da American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS, 2015), segundo as quais a acurácia de qualquer produto geoespacial só pode ser considerada validada quando aferida contra um conjunto de verificação estatisticamente independente e de exatidão superior à do próprio produto. Na prática, a boa distribuição espacial dos Pontos de Controle ao longo de toda a área tende a produzir um ajustamento mais homogêneo da nuvem de pontos; essa distribuição se torna especialmente crítica em áreas de geometria irregular, como campi universitários, nas quais edificações de alturas distintas podem gerar oclusões e distorções localizadas no modelo fotogramétrico.

Modelos Digitais de Elevação, do Terreno e de Superfície

Além do ortofotomosaico, a imagem georreferenciada e ortorretificada da área levantada e o processamento fotogramétrico de imagens de RPA produzem modelos digitais altimétricos que representam matematicamente, de forma contínua, a elevação do terreno. O Modelo Digital de Elevação (MDE) - em inglês, Digital Elevation Model (DEM) - é o termo genérico para essas representações, estruturadas como grade regular (raster) ou como Rede Irregular de Triângulos (TIN), e organizadas em torno de três componentes: uma componente horizontal (latitude e longitude), uma vertical (elevação referida a um datum geoidal ou elipsoidal) e uma temporal (a data de aquisição dos dados) (IBGE, 2025; Tuler e Saraiva, 2016).

Dentro dessa família de produtos, distingue-se o Modelo Digital de Superfície (MDS), que inclui na representação todos os objetos existentes sobre o solo - edificações, vegetação, veículos -, do Modelo Digital do Terreno (MDT), que representa exclusivamente a superfície física do solo, com esses objetos removidos por filtragem (Jensen, 2009). Assim, o MDE pode ser entendido tanto como sinônimo amplo de ambos quanto, em uma leitura mais restrita, como sinônimo específico do MDT. Essa distinção é longe de acadêmica: modelos digitais de elevação subsidiam projetos de estradas, redes de drenagem, barragens, mineração e planejamento urbano e rural, entre outras aplicações de engenharia (Jensen, 2009) - o que justifica, no caso de um levantamento cadastral de campus universitário, a exigência de controle de qualidade posicional rigoroso sobre esses produtos, já que deles dependem, por exemplo, projetos futuros de drenagem, pavimentação e acessibilidade.

Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) e Especificações Técnicas de Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV e ET-CQDG)

No Brasil, o controle de qualidade posicional de produtos cartográficos tem como fundamento legal o Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984, que instituiu o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) como índice estatístico destinado à classificação de cartas quanto à sua exatidão e à distribuição de seus erros, estabelecendo, ainda, a equivalência conceitual entre Desvio-Padrão, Erro-Padrão (EP) e Erro Quadrático Médio (EQM) (Brasil, 1984). Não obstante permanecer o fundamento normativo vigente, esse Decreto foi concebido para produtos cartográficos analógicos, cuja lógica de erro difere substancialmente da observada em produtos inteiramente digitais, como os gerados por sensores embarcados em RPA. Com vistas a adequar essa estrutura normativo à produção cartográfica digital, a Diretoria do Serviço Geográfico do Exército Brasileiro (DSG), no âmbito da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE) - instituída pelo Decreto nº 6.666, de 27 de novembro de 2008, publicou duas especificações técnicas de natureza complementar, porém funcionalmente distintas. À Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) compete, exclusivamente, os critérios de aquisição e de estruturação dos dados geoespaciais vetoriais (DSG, 2016b). Já à Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG), compete instituir o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) - categoria de exatidão criada especificamente para produtos digitais, definir os valores de

tolerância de PEC e de EP por classe e por escala, e prescrever a metodologia estatística de tendência e de precisão empregada na classificação de um produto cartográfico (DSG, 2016a; Santos et al., 2016; Concar, 2011). Estabelece-se, assim, com precisão terminológica, que os valores de PEC/EP e os procedimentos estatísticos discutidos na sequência decorrem da ET-CQDG, e não da ET-ADGV, disciplina esta restrita à etapa de aquisição dos dados.

Nos termos do Decreto nº 89.817, 20 de junho de 1984 e da ET-CQDG (DSG, 2016a), a classificação de um produto cartográfico digital em determinada escala e classe (A, B, C ou D) pressupõe o atendimento simultâneo de duas condições: que noventa por cento dos pontos avaliados apresentem discrepância posicional (relativamente a coordenadas de referência de maior exatidão) igual ou inferior à tolerância “PEC” estabelecida para a escala e classe consideradas; e que o Erro Médio Quadrático (RMS) do conjunto de discrepâncias seja igual ou inferior à tolerância “EP” (Erro Padrão) correspondente. A Classe A corresponde ao padrão de maior rigor, seguida, em ordem decrescente de exigência, pelas Classes B, C e D, gradação aplicável tanto à componente planimétrica quanto à altimétrica, esta última também associada à equidistância das curvas de nível do produto avaliado.

Análise Estatística da Acurácia: Tendência e Precisão

Um produto cartográfico pode ser preciso sem ser acurado, e vice-versa - distinção que a literatura de controle de qualidade posicional trata como fundamental. Precisão refere-se à dispersão das observações em torno de um valor médio, sendo afetada por erros de natureza aleatória; acurácia (ou exatidão) refere-se à proximidade entre o valor medido e o valor verdadeiro, sendo afetada por erros sistemáticos, também chamados de tendência ou viés (Galo e Camargo, 1994; Monico *et al.*, 2009). Avaliar de forma completa um levantamento com RPA exige, portanto, examinar os dois componentes separadamente - metodologia originalmente proposta por Merchant (1982) e posteriormente consolidada, no contexto brasileiro, por Galo e Camargo (1994).

A existência de tendência (erro sistemático) é testada estatisticamente por meio do teste *t* de Student, aplicado às discrepâncias (ΔX) entre as coordenadas obtidas no levantamento com RPA e as coordenadas de referência, levantadas por método de maior exatidão (GNSS estático ou estação total). Calculam-se a média ($\Delta \bar{X}$) e o desvio-padrão ($S\Delta X$) dessas discrepâncias e testa-se a hipótese nula $H_0: \Delta \bar{X} = 0$ contra a alternativa $H_1: \Delta \bar{X} \neq 0$; se a estatística amostral *t*

superar o valor crítico tabelado para o nível de significância adotado (α), rejeita-se H_0 e conclui-se pela existência de tendência significativa em determinado eixo - sinal de possível falha de calibração do sensor, de distribuição insuficiente de pontos de controle ou de erro de georreferenciamento. Vale notar que o teste t, por ser paramétrico, pressupõe normalidade dos dados amostrais - premissa em geral verificada previamente pelo teste de Shapiro-Wilk, de modo que sua violação recomenda o uso de métodos estatísticos complementares para uma análise mais robusta (Vitti *et al.*, 2018).

O teste de Shapiro-Wilk testa a hipótese nula de que a amostra de discrepâncias provém de uma população com distribuição normal. Sua estatística, W , é obtida a partir de uma combinação linear ponderada das observações ordenadas, cujos coeficientes dependem do tamanho da amostra, e de uma constante de escala (usualmente designada b) tabelada para o mesmo tamanho amostral; quanto mais próximo de 1 for o W calculado, maior a aderência da amostra à normalidade. Esse valor é então comparado a um W crítico tabelado para o nível de significância adotado: se o W calculado igualar ou superar o valor crítico, não rejeita-se a hipótese de normalidade, o que valida a aplicação subsequente do teste t de Student sobre a mesma amostra (Shapiro e Wilk, 1965).

A precisão, por sua vez, é avaliada pelo teste Qui-Quadrado, que compara a variância amostral das discrepâncias à variância esperada, sendo esta derivada do Erro Padrão (EP) definido pelo PEC-PCD para a classe e escala em avaliação. Rejeitar a hipótese nula desse teste equivale a concluir que o levantamento não atingiu a precisão mínima exigida para a classificação pretendida.

Um terceiro indicador, o Erro Quadrático Médio (EQM, ou Mean Square Error - MSE), combina em uma única medida os efeitos da dispersão (variância) e da tendência (viés), sendo calculado por:

$$MSE = \sigma_p^2 + b^2 \cong \sum_{i=1}^n \frac{\varepsilon_i^2}{n} \quad (2)$$

Para amostras suficientemente grandes, essa expressão se aproxima da média quadrática das próprias discrepâncias observadas (Monico *et al.*, 2009), funcionando como síntese numérica da acurácia final - frequentemente reportada, ao lado dos testes de tendência e de precisão, como critério decisivo de classificação de um produto cartográfico segundo o PEC-PCD.

Estudos Correlatos sobre Acurácia Posicional de Levantamentos com RPA

Em ambiente costeiro, Teixeira et al. (2024) mapearam um trecho de praia em Ilhéus/BA com três alturas de voo distintas (80 m, 100 m e 120 m) e obtiveram, nas três altitudes, classificação PEC-PCD Classe A - tanto na componente planimétrica (escala 1:1.000) quanto na altimétrica (equidistância de 1 m), sem qualquer tendência sistemática detectada. Os autores atribuem esse resultado ao rigor do planejamento de voo (sobreposições de 70% lateral e 80% frontal) e a uma distribuição cuidadosa dos pontos de controle, alertando que, quanto menor a altura de voo adotada, maior deve ser a densidade de pontos de controle necessária para compensar o aumento do número de fotografias a corrigir. Esse resultado, contudo, não se repete de forma automática em outro levantamento costeiro na mesma região: Santos *et al.* (2025), ao mapear a Praia dos Milionários (também em Ilhéus/BA) a 120 m de altitude com RPA equipado com RTK, identificaram uma tendência sistemática relevante no eixo Norte (0,218 m), que elevou o Erro Quadrático Médio horizontal a 0,2411 m - acima do Erro Padrão de 0,17 m exigido para a Classe A na escala 1:1.000 -, rebaixando a classificação final para a Classe B, insuficiente para análises de dinâmica morfológica costeira que demandam maior rigor.

Já em contexto urbano, o cenário tende a ser influenciado por mais fatores geradores de erros. Teixeira *et al.* (2025) avaliaram o mapeamento de duas quadras no município de Uruçuca/BA, executado a 184 m de altitude - acima, portanto, do teto de 120 m previsto pela RBAC-E nº 94 para operações VLOS sem CAER, e obtiveram Classe C na componente planimétrica, com tendência sistemática no eixo Norte (0,190 m), e Classe B na componente altimétrica. Os autores associam esse desempenho inferior justamente à altitude de voo elevada, e recomendam, para levantamentos futuros que busquem classificações mais rigorosas, reduzir a altura de voo, elevar as taxas de sobreposição (idealmente a 80% em ambas as direções) e realizar múltiplos voos em alturas e ângulos distintos - estratégias que aumentam o número de feições homólogas disponíveis para o algoritmo de Structure from Motion reconstruir com maior confiabilidade.

O que esses três casos têm em comum é a robustez do instrumento de avaliação técnica e estatística, através da combinação de teste t, teste Qui-Quadrado e EQM, ancorada no Decreto-Lei 89.817, de 20 de junho de 1984/ET-ADGV, produziu conclusões internamente consistentes nos três casos, independentemente do ambiente mapeado. O que essa consistência revela é que a acurácia posicional de um produto gerado por RPA não é atributo intrínseco da tecnologia, mas

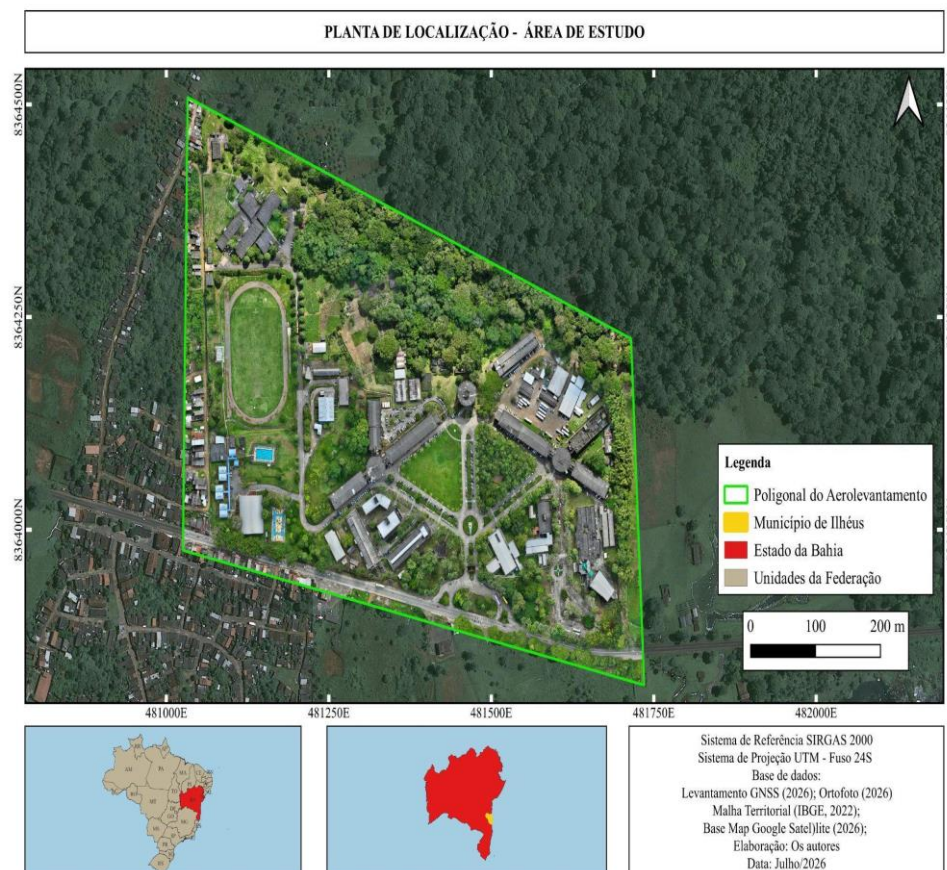
resultado direto de escolhas operacionais, tais como a altitude de voo, as taxas de sobreposição, a densidade e a distribuição de pontos de controle e a calibração do sensor; cuja combinação precisa ser deliberadamente ajustada à finalidade pretendida do levantamento.

METODOLOGIA

O estudo foi realizado no Campus Soane Nazaré de Andrade da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC) localizado no município de Ilhéus-BA (Figura 1) com área de voo de 32,60 ha. A escolha do local se deu em razão da diversidade de elementos da área, onde nota-se a presença de edificações, vias pavimentadas, áreas verdes, infraestrutura urbana, relevo com variações de altitude características que permitem avaliar o desempenho de levantamentos aerofotogramétricos destinados ao cadastro técnico.

Figura 3

Área de estudo: Campus Soane Nazaré de Andrade (UESC)



Fonte: Os autores , 2026.

O estudo possui natureza quantitativa e experimental, por meio da comparação entre coordenadas obtidas por Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) e coordenadas determinadas em campo por receptores GNSS de alta precisão.

Inicialmente foi realizado o planejamento do estudo, definindo em escritório a área de interesse, os locais dos Pontos de Controle (PC's) e dos Pontos de Verificação (PV's), considerando a disposição em locais abertos e de fácil acesso, considerando as características da área de estudo, altitude de operação, sobreposição frontal e lateral das imagens, velocidade da aeronave e resolução espacial pretendida (Ground Sample Distance – GSD).

Em seguida definiu-se que seriam implantados 11 PC's e 3 PV's em diferentes setores do campus, a determinação das coordenadas pontos foi realizada por meio da técnica de posicionamento *Real Time Kinematic* (RTK) utilizando o receptor GNSS TRIMBLE R12i.

Após a etapa de posicionamento, os dados brutos da estação base GNSS foram descarregados no notebook, em seguida convertidos em formato Rinex 3.0 e processado e ajustado no *software* Topcon Tools com a base RBMC da UESC, obtendo ao final do processamento as coordenadas UTM do levantamento, adotando-se como sistema de referência o SIRGAS2000.

O levantamento aerofotogramétrico foi executado utilizando o aplicativo DJI Pilot e uma RPA do modelo DJI Mavic 3 Enterprise (Figura 4) equipada com câmera digital de alta resolução e sistema de posicionamento GNSS PPK embarcado, permitindo o georreferenciamento direto das imagens e reduzindo a necessidade de pontos de apoio em solo, conforme metodologia empregada por Teixeira et al. (2025), Amaral et al. (2025) e Santos et al. (2025). Os seguintes parâmetros foram utilizados para o voo automatizado: sobreposição frontal de 70% e lateral de 80 %, altura de voo a 120 m e velocidade de 15 m/s, 720 imagens, utilizando uma bateria, com Ground Sample Distance (GSD) estimado em 2,16 cm/pixel e tempo total de voo de 15 minutos e 24 segundos, conforme descrito na Tabela 1 abaixo.

Figura 4

RPA utilizada em campo, DJI Mavic 3 Enterprise.



Fonte: DJI , 2026.

Tabela 1

Dados gerais do fotoaerolevanteamento.

Imagens	720
Altura	120 m
Velocidade	15 m/s
GSD	2,16 cm/pixel
Tempo de voo	15 min 24 s

O levantamento foi realizado em horário matutino (8h - 12h) de tempo firme e ensolarado, em condições de operação de contato visual contínuo do piloto com o drone. Como o peso da aeronave está entre 250g e 25 Kg, enquadra-se na Classe 3, segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2017), sendo necessário o cadastro da aeronave no sistema de aeronaves não tripuladas (SISANT), bem como a homologação do cadastro do operador e a solicitação de acesso ao espaço aéreo. Uma vez que o plano de voo foi autorizado pelo SARPAS, a operação foi iniciada.

Através do fotoaerolevanteamento, foram adquiridas 720 imagens alinhadas, associadas a 15 marcadores no solo, das quais foram utilizados 14, dado que um deles não foi possível de ser claramente identificado, restando assim 11 pontos de controle e 3 pontos de verificação; estes pontos foram materializados no solo através de octógonos de papelão com uma pintura em vermelho no formato de X contendo um quadrilátero de papel laminado ao centro para melhor visualização. O modelo da câmera (M3E) detém grande-angular com sensor CMOS de 4/3 e resolução de 20 MP, obturador mecânico e tamanho de pixel de 3,3 μm (DJI, 2025), permitindo resolução de imagens de até 5280 x 3956 pixels, com distância focal de 12,29 mm, sendo previamente calibrada através de uma matriz de coeficientes para correlação de erros do equipamento, esta matriz foi composta pelos coeficientes f , c_x , c_y , k_1 - k_3 , p_1 e p_2 , expostos de maneira estimada na Tabela 2 abaixo.

Tabela 2

Coefficientes de calibração da câmera.

	Valor	Erro
F	3735,29	0,44
Cx	19,3633	0,019
Cy	-9,97523	0,021
K1	-0,137704	$6,1 * 10^{-5}$
K2	0,0665257	$9,9 * 10^{-5}$
K3	-0,0614471	$6,9 * 10^{-5}$
P1	-0,000111368	$1,3 * 10^{-6}$
P2	$-4,04876 * 10^{-6}$	$1,5 * 10^{-6}$

Após a aquisição das imagens, os dados foram processados no *software* Agisoft Metashape, utilizando a técnica de Structure from Motion (SfM), seguindo o fluxo convencional de processamento composto pelas etapas de alinhamento das imagens, calibração automática da câmera, geração da nuvem densa de pontos, construção do Modelo Digital de Superfície (MDS), Modelo Digital do Terreno (MDT) e ortofotomosaico. Para o levantamento realizado, o tamanho do pixel obtido foi de 2,25 cm/pix, levando a uma densidade de 0,198 pontos/cm². O algoritmo do método SfM identificou 1.598.402 pontos homólogos dos 1.720.564, com um erro de reprojeção RMS de 0,598048 pixel. As imagens foram realinhadas com elevada precisão, a partir de pré-seleção genérica e por referência, limitando até 40.000 key points e sem limitação predefinida para tie points. Após o alinhamento, os coeficientes de calibração da câmera dispostos na Tabela 1 foram utilizados para minimizar os erros considerados sistemáticos, associados ao processamento de dados.

Na etapa subsequente, foram construídos os mapas de profundidade, a fim de embasar a reconstrução da nuvem de pontos densa; para isso, a qualidade adotada foi ultra alta com modo de filtragem agressiva. A nuvem de pontos gerada detém 1.153.004.237 elementos, com precisão de coordenadas de 5,62 mm, posteriormente classificada para segregação dos pontos de terreno com limite angular de 15°, distância máxima de 0,10 m e tamanho de célula de 20 m. Assim, os pontos classificados como pertencentes ao terreno foram aplicados na construção do MDT e todos os pontos constituíram o MDS, com precisões respectivas de 17,7 cm/pixel e 2,25 cm/pixel. A partir do MDT tomado como superfície de referência, foi produzido o ortomosaico com

resolução final de 2,25 cm/pixel, através da combinação Mosaic, com interpolação e preenchimento de lacunas habilitados como funções do processamento computacional.

Os produtos cartográficos gerados no sistema de referência SIRGAS 2000 / UTM, Zona 24 Sul (EPSG:31984) constituíram a base para a avaliação da qualidade geométrica do levantamento. Os metadados coletados automaticamente com GNSS embarcado na aeronave remotamente pilotada foram utilizados para posicionamento espacial da mesma, contudo, para fins de georreferenciamento, os dados foram amarrados a partir de pontos de controle, levantados fisicamente em campo com aparelho receptor GNSS de modelo Trimble R12i GNSS System, configurado para o modo de coleta RTX (Real Time eXtended ou Centerpoint), com intervalos de coleta de 5s por dado. Para validação da acurácia posicional foram utilizados 3 pontos de verificação distribuídos uniformemente em toda a área de estudo, permitindo a comparação entre as coordenadas obtidas pelo receptor GNSS e aquelas extraídas dos produtos cartográficos.

A avaliação da qualidade cartográfica foi realizada conforme os critérios estabelecidos pelo Decreto nº 89.817, de 12 de junho de 1984, que institui o Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), instituído pela Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG) - distinta, portanto, da Especificação Técnica para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV), empregada apenas na etapa de aquisição dos dados vetoriais. Foram calculadas as discrepâncias planimétricas (ΔE e ΔN) e altimétricas (ΔH) entre os pontos de verificação e os pontos homólogos identificados nos produtos cartográficos.

A análise estatística contemplou inicialmente a verificação da existência de tendência sistemática mediante aplicação do teste t de Student, considerando nível de significância de 5%, a fim de averiguar tendências nas discrepâncias associadas ao conjunto de dados. Posteriormente foi avaliada a precisão dos dados utilizando o teste Qui-quadrado (χ^2), conforme os procedimentos definidos pela ET-CQDG (DSG, 2016a). Também foi calculado o Erro Quadrático Médio (EQM) nas componentes planimétricas e altimétricas, permitindo quantificar a magnitude dos erros observados.

Por fim, os resultados obtidos foram comparados com os limites estabelecidos pelo PEC-PCD para a escala cartográfica adotada, possibilitando o enquadramento do levantamento nas classes A, B ou C. A interpretação conjunta dos testes de tendência, precisão e do EQM permitiu verificar se os produtos cartográficos apresentam qualidade suficiente para aplicação em levantamentos cadastrais, planejamento da infraestrutura universitária e futuras intervenções de

engenharia.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A fim de delimitar a posição do levantamento, foram dispostos 11 pontos de controle marcados fisicamente no solo, extraindo deles através de receptor GNSS modo RTK seu posicionamento. Suas coordenadas planimétricas foram referenciadas ao SIRGAS2000, projeção UTM, fuso 24 S centrado no meridiano 39°W, calculadas na época 2026,5. Os valores destas coordenadas para os pontos de controle foram dispostos conforme a Tabela 3 abaixo:

Tabela 3

Coordenadas planimétricas obtidas por GNSS dos pontos de controle

Ponto	Este (m)	Precisão E (m)	Norte (m)	Precisão N (m)
P02	481241,456	0,008	8364103,318	0,008
P04	481369,718	0,008	8364073,090	0,008
P05	481431,465	0,012	8364164,116	0,012
P06	481473,258	0,008	8364004,781	0,008
P07	481466,683	0,008	8364055,160	0,009
P09	481586,490	0,009	8364070,165	0,009
P10	481633,258	0,009	8364030,744	0,010
P11	481605,887	0,009	8363954,907	0,008
P12	481647,360	0,026	8363927,632	0,022
P13	481125,200	0,008	8364138,355	0,008
P14	481106,607	0,007	8364294,000	0,008

De modo análogo, foram dispostos os pontos de checagem do levantamento, utilizados enfim para avaliar a acurácia do mesmo, descritos na Tabela 4 abaixo:

Tabela 4

Coordenadas planimétricas obtidas por GNSS dos pontos de verificação

Ponto	Este (m)	Precisão E (m)	Norte (m)	Precisão N (m)
P03	481340,496	0,009	8364136,540	0,009

P08	481521,973	0,017	8364029,494	0,112
P15	481146,281	0,008	8364297,170	0,009

Para os pontos de checagem, é possível perceber uma imprecisão demasiada do ponto P08 em relação aos demais, para uma das coordenadas. Uma das possibilidades que justificam este resultado é a influência da vegetação que circunda o ponto, capaz de distorcer a captura de dados do levantamento, a partir de interferência direta no imageamento. Vale ressaltar que o tamanho amostral de pontos de verificação ($n = 3$) torna reduzida a quantidade de graus de liberdade, sendo estes apenas dois; neste contexto, a amostra disponível é insuficiente para detectar tendências, distribuição de dados e presença de *outliers*.

Para além das questões estatísticas supracitadas, o número é também extremamente reduzido para representar espacialmente toda a área estudada, sem que haja discrepâncias visuais; bem como identificar deformações locais e classificar a classe de precisão cartográfica, uma vez que seria necessário que 90% da amostra inteira obtivesse comportamento superior ao exigido em cada categoria.

Já para a delimitação das altitudes normais, as altitudes elipsoidais, coletadas com o receptor GNSS, foram convertidas a partir do hgeoHNOR2020, modelo geoidal construído pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) com regulagem altimétrica oficial brasileira baseada nos DATUM altimétricos Imbituba - SC e Santana - AP. Assim, as altitudes normais dos pontos de controle são necessárias para geração dos modelos digitais de superfície (Tabela 5) e dos de checagem necessários para controle da acurácia altimétrica, conforme Tabela 6.

Tabela 5

Altitudes normais dos pontos de controle

Ponto	Elevação (m)	PrecVt (m)
P02	22,710	0,038
P04	14,333	0,035
P05	14,105	0,042
P06	13,613	0,035
P07	13,754	0,043
P09	14,589	0,068
P10	13,904	0,067
P11	14,177	0,047
P12	15,614	0,072

P13	19,483	0,046
P14	19,347	0,042

Tabela 6

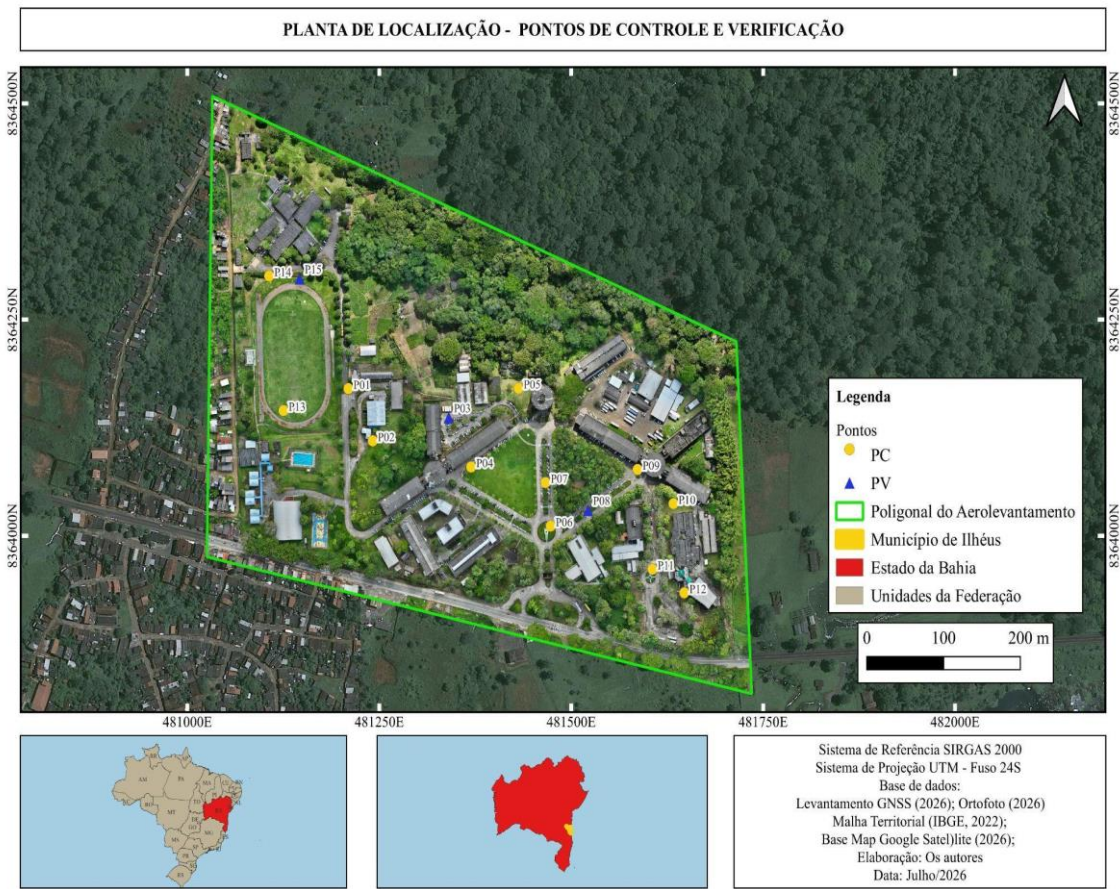
Altitudes normais dos pontos de checagem

Ponto	Elevação (m)	PrecVt (m)
P03	14,324	0,043
P08	13,955	0,088
P15	19,592	0,033

A localização dos pontos de controle e checagem está expressa graficamente sobre a área de estudo na Figura 4 disposta abaixo:

Figura 5

Localização dos pontos de controle e verificação.



Fonte: Os autores, 2026.

Sendo assim, o cálculo de erros médios entre o levantamento e a localização prévia dos pontos de checagem está disposta na Tabela 7 em cada uma das direções, sendo a coordenada X referente ao Este, a coordenada Y ao Norte, a coordenada Z a altimetria, o erro XY planimétrico e o erro total projetado entre as três dimensões.

Tabela 7

Erros dos pontos de verificação

Ponto	ΔE (cm)	ΔN (cm)	ΔH (cm)	Erro 2D (cm)	Erro 3D (cm)
P03	0,365	-7,487	-3,083	7,496	8,105
P08	-2,189	1,549	-10,787	2,682	11,116
P15	-1,048	0,917	-2,549	1,392	2,904
Total	1,417	4,446	6,643	4,666	8,118

A partir destes erros associados ao levantamento, é preciso associar aos padrões de exatidão cartográfica requeridos para a geração de produtos cartográficos digitais pelo Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984/ET-CQDG, buscando ver se o uso de VANT's atende a acurácia requerida ao mapeamento. Neste cerne, no que diz respeito à planimetria, os valores de PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) de erro médio (EM) e EP (Erro Padrão) esperado, estão dispostos na Tabela 8 abaixo:

Tabela 8

Valores de erro médio (EM) e erro padrão (EP), em metros na planimetria, para CDGV em grandes escalas.

PEC-PCD	1:1000		1:2000		1:5000	
	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)	EM (m)	EP (m)
A	0,28	0,17	0,56	0,34	1,40	0,85
B	0,50	0,30	1,00	0,60	2,50	1,50
C	0,80	0,50	1,60	1,00	4,00	2,50
D	1,00	0,60	2,00	1,20	5,00	3,00

Fonte: DSG, 2016.

De mesmo modo, a Tabela 9 define os padrões associados à exatidão altimétrica conforme o Decreto nº 89.817, de 20 de julho de 1984/ ET-CQDG.

Tabela 9

Valores de erro médio (EM) e erro padrão (EP), em metros na altimetria, para CDGV em grandes escalas

PEC-PCD	1:1000		1:2000		1:5000		1:10000	
	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)	PEC (m)	EP (m)
A	0,27	0,17	0,27	0,17	0,54	0,34	1,35	0,84
B	0,50	0,33	0,50	0,33	1,00	0,67	2,50	1,67
C	0,60	0,40	0,60	0,40	1,20	0,80	3,00	2,00
D	0,75	0,50	0,75	0,50	1,50	1,00	3,75	2,50

Fonte: DSG, 2016.

Quando realizado o teste de Shapiro-Wilk com significância de 95%, a fim de verificar a normalidade da distribuição, as discrepâncias apresentam distribuição considerada normal, conforme Tabela 10 abaixo:

Tabela 10

Teste de Shapiro-Wilk (Análise de Normalidade).

	ΔE	ΔN	ΔH
Constante b	1,806	6,390	5,826
W calculado	0,996	0,802	0,798
Resultado	Atende	Atende	Atende

Atende: Não foram encontradas evidências suficientes para rejeitar a hipótese de normalidade, ressalvada a baixa capacidade inferencial decorrente de $n=3$.

Para todos os casos, o W calculado foi maior que 0,767, indicando não rejeição da hipótese H_0 , onde a amostra se comporta como uma distribuição normal.

Avaliação Planimétrica

A partir destas determinações, foi realizado o teste T de Student para avaliação planimétrica, conforme o método previamente descrito; para tal, foi adotado um nível de confiabilidade de 95% para que a média dos erros amostrais seja estatisticamente igual a zero como hipótese nula.

Tabela 11

Análise de tendência dos dados planimétricos utilizando teste T de Student.

	Este	Norte
Número de amostras	3	3
Média das discrepâncias (Δx)	-0,0096	-0,0167
Desvio Padrão ($S_{\Delta x}$)	0,0128	0,0504
Variância ($S^2_{\Delta x}$)	0,0002	0,0025
Estatística amostral (t_x)	-1,2958	-0,5746
$T_{95\%}$ tabelado	4,3027	4,3027
Resposta do teste	Não há evidências significativas	

Atende: Não se rejeita H_0 .

Os resultados expostos na Tabela 11 acima indicam que não foram encontradas evidências estatísticas suficientes para rejeitar a hipótese de ausência de tendência, considerando-se o reduzido tamanho amostral. Finalmente, então, foi analisada a distribuição Qui-Quadrado para os parâmetros planimétricos requeridos, tal que fosse o objetivo verificar para qual escala há nível de confiabilidade do levantamento para Classe A, com 95% de significância. Neste caso, os resultados estão expostos na Tabela 12 abaixo:

Tabela 12

Teste de Qui-Quadrado planimétrico a nível de significância α de 95% na escala de 1:1000.

Parâmetro	PEC-PCD Classe A	
	Este (E)	Norte (N)
Valor de χ^2	0,011	0,176
Estatística $\chi^2_{(x-1):\alpha}$	4,605	4,605
Respostas do teste	Não há evidências suficientes para rejeitar H_0	

O erro quadrático médio (EQM) horizontal encontrado foi de 0,0668 m (Tabela 13), significativamente menor que o erro padrão planimétrico exigido do PED-PCD para Classe A na escala estudada (1:1000), a qual é a maior escala normatizada neste documento, ou seja, a de maior exigência de erros, sendo EP = 0,17 m. Assim, ainda que carecendo de amostragem mais robusta, os produtos gerados podem atender às exigências associadas à Classe A. A utilização do EQM como um indicador válido para a acurácia posicional é com base no estudo de Mikhail e Ackermann (1976); para isto, a Tabela 13 a seguir apresenta a avaliação de acurácia planimétrica.

Tabela 13

Medidas de tendência, precisão e acurácia.

Componente	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Acurácia (m)
Este (m)	-0,0096	0,0128	-0,0096 ± 0,0128
Norte (m)	-0,0167	0,0504	-0,0167 ± 0,0504
Horizontal (E/N) (m)	0,0193	0,0520	0,0193 ± 0,0520
EQM horizontal			0,0668

A fim de analisar sistematicamente os critérios de atendimento das discrepâncias do levantamento à normativa brasileira vigente, foi montada a Tabela 14 abaixo, contendo o esquema analítico de correlação entre os dados encontrados e a limitrofia do Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984/ET- ADGV.

Tabela 14

Acurácia Posicional Planimétrica de Acordo com o Decreto-Lei 89.817, de 20 de junho de 1984/ET- ADGV.

Parâmetro	Resultado
Média	0,0193 m
RMS horizontal	0,0668 m
Desvio padrão horizontal	0,0520 m
Tamanho da amostra	3
Há tendência no dado espacial?	Não é possível perceber tendência
PEC-PCD (1:1000; Classe A)	0,280 m
EP (1:1000; Classe A)	0,170 m
RMS < EP ?	Sim
Discrepâncias < PEC (%)	100
Dado espacial é atende ao Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984 /ET ADGV)?	Sim
Dado espacial é acurado?	Sim

Com base nesta análise, o ortofotomosaico pode ser classificado como Classe A a respeito do atendimento dos critérios planimétricos para acurácia.

Avaliação Altimétrica

Já no que diz respeito à altimetria, onde as discrepâncias altimétricas também apresentaram distribuição normal, foram realizados, de maneira análoga, os testes de t de Student e Qui-quadrado. Para o primeiro, buscou-se avaliar a existência de tendências possivelmente relacionadas aos erros sistemáticos na composição da amostra, considerando 95% de significância, conforme disposto na Tabela 15 abaixo:

Tabela 15

Análise de tendência dos dados altimétricos utilizando teste T de Student.

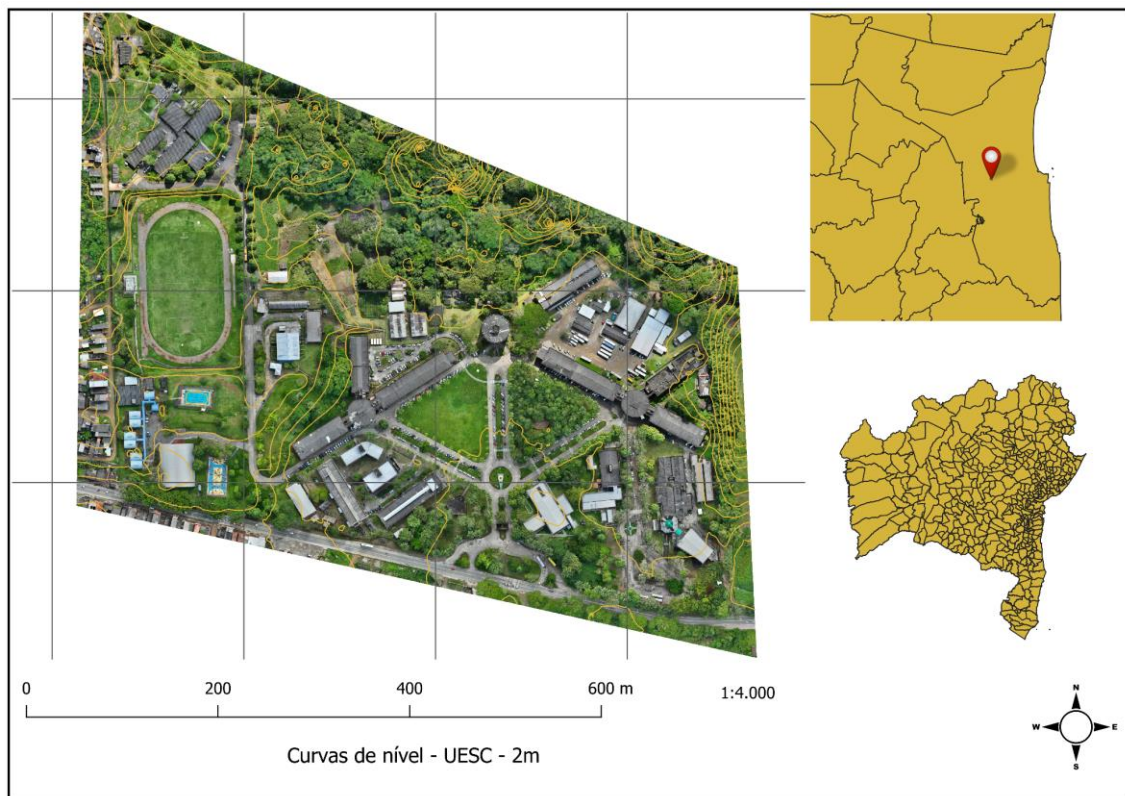
	ΔH
Número de amostras	3
Média das discrepâncias (Δx)	-0,0547
Desvio Padrão ($S_{\Delta x}$)	0,0461
Variância ($S^2_{\Delta x}$)	0,0021
Estatística amostral (t_x)	-2,0563
$T_{95\%}$ tabelado	4,3027
Resposta do teste	Não há evidências significativas

Atende: Não se rejeita H_0 .

Com esse teste, não foi possível encontrar tendências relacionados a erros sistemáticos na construção do modelo digital de terreno, contudo, assim como na fase de análise planimétrica, o tamanho demasiadamente reduzido da amostra torna essa análise frágil, carente de robustez para garantia da ausência de erros sistemáticos. Ainda que com essa ressalva, foi realizado o teste de distribuição Qui-Quadrado, a fim de avaliar a precisão; para tal, foi adotado também um nível de significância de 95%. O objetivo foi avaliar o enquadramento do MDT no padrão de exatidão cartográfica PEC-PCD para a Classe B; portanto, foram geradas as curvas de nível com equidistância altimétrica de 2 m, conforme Figura 6 abaixo:

Figura 6

Curvas de nível equidistantes de 2 m.



Fonte: Os autores , 2026.

Assim, foi aplicado o teste conforme descrito na Tabela 16 abaixo:

Tabela 16

Teste de Qui-Quadrado altimétrico a nível de significância α de 95% na escala de 1:1000.

Parâmetro	PEC-PCD Classe B
	Altitude (H)
Valor de χ^2	0,039
Estatística $\chi^2_{(x-1);\alpha}$	4,605
Respostas do teste	Não há evidências suficientes para rejeitar H_0

Logo, não há meios suficientes, com a análise realizada, para detectar imprecisão explícita no levantamento altimétrico. Assim, o erro quadrático médio (EQM) vertical foi de 0,0948 m (Tabela 17), inferior ao exigido para a Classe B estudada, ou seja, o levantamento pode compor produtos cartográficos digitais de elevação nesta classe; vale ressaltar que a mesma é

homologada apenas para produtos com curvas de nível equidistantes a partir de 5 m, valor superior ao utilizado para a avaliação da precisão do levantamento.

Tabela 17

Medidas de tendência, precisão e acurácia.

Componente	Média (m)	Desvio Padrão (m)	Acurácia (m)
Altimetria (m)	-0,0547	0,0461	-0,0547 ± 0,0461
EQM vertical			0,0948

Assim, a síntese da acurácia posicional altimétrica (Tabela 18) associou os limites do Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984 e da ET-ADGV e indica que provavelmente o dado detém a acurácia exigida, ressalvado o tamanho pequeno da amostra.

Tabela 18

Acurácia Posicional Altimétrica de Acordo com o Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984 /ET- ADGV.

Parâmetro	Resultado
Média	-0,0547 m
RMS horizontal	0,0461 m
Desvio padrão horizontal	0,0021 m
Tamanho da amostra	3
Há tendência no dado espacial?	Não é possível perceber tendência
PEC-PCD (1:1000; Classe B)	1,000 m
EP (1:1000; Classe B)	0,667 m
RMS < EP ?	Sim
Discrepâncias < PEC (%)	100
Dado espacial atende ao Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984 /ET ADGV)?	Sim
Dado espacial é acurado?	Sim

Discussão dos Resultados

Em termos comparativos, o pior desempenho percebido entre as coordenadas de análise foi na direção norte, perpendicular ao sentido do voo na maior parte do trajeto. Acredita-se que a velocidade do movimento pode ter contribuído para a distorção nesse sentido, aumentando a distorção das bordas de cada imagem . Uma solução para evitar distorções em coordenadas

planimétricas é planejar o voo de maneira cruzada, prática recomendada para alturas e velocidades maiores do levantamento, que garante homogeneidade na compilação dos dados.

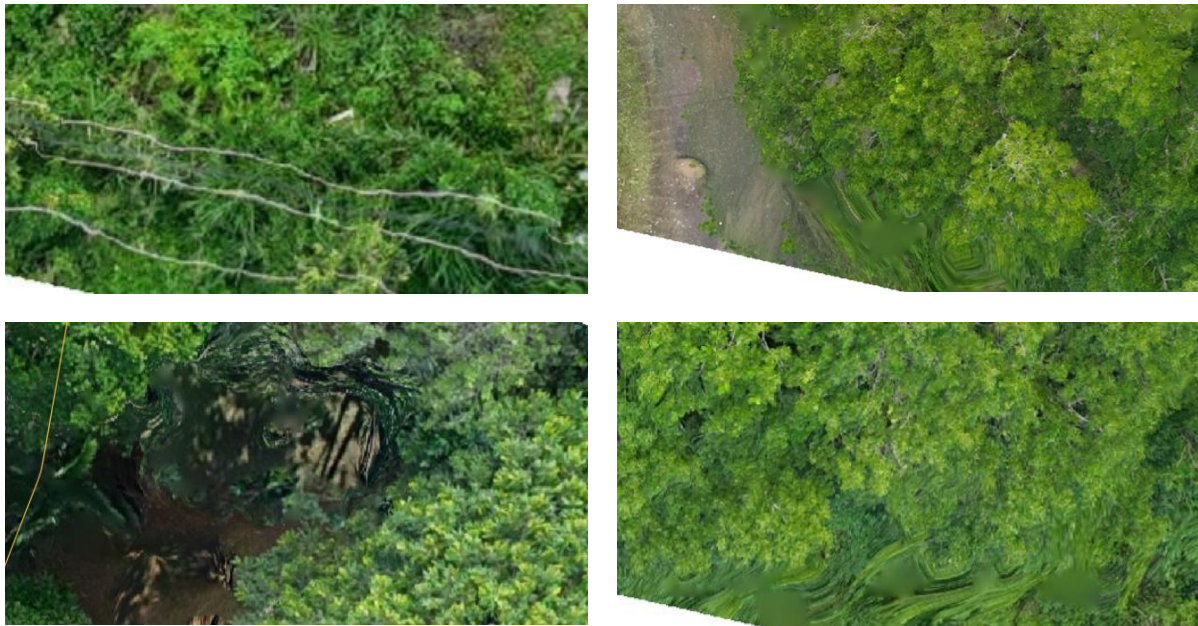
Dentre os poucos pontos de checagem, P08 obteve distorções muito maiores em relação aos demais; algumas das possibilidades que influenciam isso são a vegetação próxima ao ponto (arbustos, árvore), uma possível movimentação do ponto durante o levantamento, uma vez que os marcadores são de material leve e de difícil fixação rígida ou a presença de reflexo de imagem provocada por metais como carros. A solução mais adequada para o levantamento seria o descarte de pontos como este, que funcionam como *outliers* da propagação de erros, contudo, essa solução não foi possível dada a já baixa quantidade de pontos de checagem.

A localização dos pontos de controle e checagem esteve muito mais concentrada na metade direita da área estudada, este fator pode ter contribuído para um baixo refinamento na construção dos dados em zonas menos amarradas, potencializando distorções, em especial no lado oeste da área de estudo. Apesar disso, a utilização de PPK (Cinemática Pós-Processada) permitiu que as coordenadas corrigidas após o trabalho de campo fomentam melhor qualidade e precisão na exibição dos dados. Para além disso, este método permite com que a demanda dos pontos de controle em solo seja reduzida, otimizando o tempo de trabalho e a quantidade de equipe e equipamentos dispostos em um levantamento; este fator viabiliza execuções com custo agregado menor e contribui para a descrição topográfica de mais áreas.

Apesar da estimativa de ângulo para filtragem de vegetação e edificações para formação do MDT, ainda podem haver reminiscências dos mesmos, com difícil filtragem angular direta. Outro determinante é que quando se realiza a filtragem angular para supressão destes elementos e processamento único do terreno, podem ser perdidos dados de taludes íngremes, recortes em encostas e áreas degradadas, elementos comuns em áreas com intensa ação antrópica e ocupação, bem como a área de estudo. Por conta de fatores como este, o levantamento altimétrico com aeronave remotamente pilotada não pode substituir, sob nenhuma hipótese, o uso de equipamentos de solo, como a estação total. Estes equipamentos, em um uso detalhado e refinado, garantem que detalhes como este não sejam despercebidos ao produto cartográfico. Outro fator otimizado com esta associação de tecnologias são as distorções nas bordas do levantamento, onde não há sobreposição lateral. Para este levantamento, este fator foi observado especialmente nas bordas norte e sul do ortofotomosaico, conforme exemplos expressos na Figura 7 abaixo:

Figura 7

Exemplos de distorção nas bordas do ortofotomosaico.



Fonte: Os autores, 2026.

Assim, a Classe B encontrada no caso altimétrico não permite que os dados sejam usados para fins de análise de risco por movimento de massa, elaboração de projetos civis executivos ou de infraestrutura; contudo, podem compor levantamentos mais generalistas a nível municipal como a identificação de sub-bacias e regiões de macrodrenagem. Já o levantamento planimétrico, o qual atendeu os requisitos da Classe A, é capaz de compor levantamentos cadastrais para metragem de edifícios, uso e ocupação do solo, identificação de áreas vegetadas, arruamentos e inspeções macroscópicas da infraestrutura urbana. Apesar da excelente resolução, o fotoaerolevanteamento pode apresentar dificuldades em representar elementos mais pontuais e que podem ser obliterados momentaneamente, como poços de visita, sarjetas, bueiros, postes, tachões, etc. Para ambos, recomenda-se o uso apoiado por vistoria técnica em campo e uso de equipamentos de medição terrestre com precisão suficiente para garantir os requisitos técnicos do projeto a ser entregue.

Acredita-se que os erros encontrados não têm relação direta prioritária com o GSD, uma vez que 2,16 cm/pixel é considerada uma resolução adequada para atingir o grau de acurácia requerido. Fatores como a quantidade e o posicionamento dos pontos de controle e checagem tendem a ser mais determinantes na obtenção dos resultados e na propagação de erros mais significativos. Mesmo diante da exclusividade de fatores ligados aos equipamentos, a velocidade

de voo e o traçado do plano de voo tendem a executar maior influência sobre a qualidade do produto cartográfico para o presente caso, dado o objetivo cadastral da representação.

No que diz respeito à planimetria, Dos Santos *et al.* (2025) revelam que o levantamento não foi suficiente para obtenção da Classe A, fator distinto do presente produto, integrando a Classe B, contudo, o tamanho maior da amostra de pontos de verificação ($n = 8$) pode ter sido capaz de representar melhor as incongruências do levantamento. Já no que diz respeito à altimetria, Amaral *et al.* (2025) obtiveram melhor desempenho (Classe A), se comparados ao presente estudo, contudo o levantamento foi realizado numa área litorânea, composta majoritariamente por faixa de areia e terreno plano não edificado, fatores cruciais para o comprometimento do produto cartográfico espacial, uma vez que a filtragem dos dados de vegetação e edifícios das nuvens de pontos gera a perda de informações relevantes para a construção do MDT.

Portanto, para áreas com constituição similar à deste levantamento, há uma tendência de melhor desempenho planimétrico em relação ao altimétrico, fator geralmente invertido quando se tratam de áreas abertas e planas, onde o desempenho planimétrico é mais afetado pela ventilação e movimentação de partículas desagregadas ao solo.

CONCLUSÃO

O presente estudo avaliou a acurácia posicional planimétrica e altimétrica de produtos fotogramétricos obtidos por Aeronave Remotamente Pilotada, em voo realizado a 120 m acima do terreno, no Campus Soane Nazaré de Andrade da Universidade Estadual de Santa Cruz. A análise concentrou-se no ortomosaico e nos modelos digitais gerados, tendo como referência coordenadas determinadas em campo por posicionamento GNSS e os critérios nacionais de controle de qualidade cartográfica.

A aplicação do teste de Shapiro-Wilk não indicou evidências suficientes para rejeitar a hipótese de normalidade das discrepâncias. De modo semelhante, os resultados do teste t de Student não permitiram rejeitar a hipótese de ausência de tendência significativa nas componentes Este, Norte e altitude normal. Esses resultados, entretanto, devem ser interpretados com cautela, considerando-se o reduzido número de pontos independentes de verificação e, consequentemente, a limitada capacidade inferencial dos testes estatísticos empregados.

De acordo com os cálculos e enquadramentos apresentados no estudo, os produtos alcançaram Classe A para a componente planimétrica e Classe B para a componente altimétrica, na escala 1:1.000. Tal desempenho indica que os produtos fotogramétricos possuem potencial para apoiar atividades de reconhecimento territorial, atualização cartográfica, planejamento da infraestrutura, gestão patrimonial e organização espacial do campus. Contudo, sua utilização em intervenções de engenharia que demandem maior rigor geométrico deve ser precedida de avaliação específica da qualidade requerida para cada aplicação.

A qualidade inferior observada em determinadas componentes pode estar associada à combinação de fatores como altura de voo, configuração das sobreposições, geometria e distribuição dos pontos de controle, condições de cobertura do terreno e incerteza das coordenadas de referência. No caso do ponto P08, a precisão inferior do posicionamento GNSS, especialmente na componente Norte, sugere possível influência de obstruções e multicaminho provocados pela vegetação existente nas proximidades. Essa interpretação deve ser entendida como hipótese técnica, uma vez que o experimento não foi estruturado para isolar e quantificar individualmente a contribuição de cada fonte de erro.

Os resultados demonstram que a aerofotogrametria com RPA constitui uma tecnologia relevante para a produção e atualização da componente cartográfica de um cadastro universitário. Entretanto, os produtos obtidos não devem ser considerados substitutos integrais dos levantamentos geodésicos e topográficos terrestres, especialmente quando estiverem envolvidos limites físicos ou jurídicos, elementos não visíveis nas imagens, áreas obstruídas por vegetação ou aplicações que exijam precisão centimétrica comprovada.

As conclusões do trabalho estão condicionadas às características específicas do levantamento e ao emprego de apenas três pontos de verificação. Recomenda-se, em estudos futuros, ampliar e redistribuir espacial e altimetricamente a amostra de pontos independentes, reobservar ou substituir pontos com elevada incerteza, documentar integralmente o processamento GNSS e fotogramétrico e comparar diferentes alturas de voo, taxas de sobreposição e configurações de controle terrestre. Também se recomenda a apresentação das discrepâncias individuais e o recálculo detalhado dos indicadores estatísticos utilizados na classificação PEC-PCD.

Conclui-se, portanto, que os produtos fotogramétricos avaliados apresentam viabilidade técnica para apoiar a gestão territorial e patrimonial do campus, desde que empregados de acordo com a acurácia efetivamente demonstrada e integrados a outros métodos de levantamento e fontes

de informação. A adoção dessa tecnologia deve ser acompanhada de planejamento rigoroso, controle geodésico adequado e validação posicional independente, de modo que os produtos gerados sejam compatíveis com as finalidades cadastrais e de engenharia a que se destinam.

REFERÊNCIAS

- Alves Junior, A. P., & Gomes, L. N. (2022). Acurácia de pontos de projeção cartográfica de ortofotos obtidas com aeronave remotamente pilotada (RPA). *Geografares*, 34, 165–185. <https://doi.org/10.47456/geo.v1i34.36298>
- Amaral, Débora M. *et al.* Gestão Costeira: Avaliação da Acurácia Altimétrica em Levantamentos Topográficos com RPA para fins de Monitoramento de Impactos Ambientais. *Revista de Gestão e Secretariado. GeSec*, 2025, 01-27. <http://doi.org/10.7769/gesec.v16i8.5140>
- ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. (2017). *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil. RBAC-E n° 94. Emenda N. 00.* https://www.defesa.gov.br/arquivos/cartografia/dica/legislacao/rbac_e_94_anac_02_05_2017.pdf
- ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil. (2023). *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil. RBAC-E n° 94. Emenda N. 03.* <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94-emd-03>
- ASPRS – American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. (2015). *Positional accuracy standards for digital geospatial data.*
- Bernardo, M. E. C. (2021). *Aplicação de Aeronave Remotamente Pilotada (drone) em engenharia civil: Levantamento bibliográfico e estudo de caso* [Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Amazonas].
- Brasil. (1984). *Decreto n° 89.817, de 20 de junho de 1984.* Estabelece as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. *Diário Oficial da União.* http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm
- Brito, J. L. N. S., & Coelho Filho, L. C. T. (2007). *Fotogrametria digital.* EdUERJ.
- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>
- Concar – Comissão Nacional de Cartografia. (2011). *Especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais (ET-ADGV).*
- Dos Santos, Davi B. *et al.* Avaliação da Acurácia de Mapeamento Planimétrico Executado por Aeronaves Remotamente Pilotadas para Fins de Caracterização de Linhas de Costa. *Revista de Gestão e Secretariado. GeSec*, 2025, 01-27. <http://doi.org/10.7769/gesec.v16i8.5170>
- DJI, Disponível em: <<https://www.dji.com/br>>. Acesso em 22 de julho de 2026.

- DroneShow. (2022, 4 de outubro). *VANT eBee é o primeiro certificado pela ANAC para voos BVLOS*. <https://droneshowla.com/vant-ebree-o-primeiro-certificado-pela-anac-para-voos-bvlos/>
- DSG – Diretoria do Serviço Geográfico do Exército Brasileiro. (2016). *Especificação técnica para aquisição de dados geoespaciais vetoriais de defesa da Força Terrestre* (EB80-N-72.003, 2a ed.).
- Eisenbeiss, H. (2009). *UAV photogrammetry* [Dissertação, ETH Zurich, Institute of Geodesy and Photogrammetry]. Dissertation No. 18515.
- Galo, M., & Camargo, P. O. (1994). Utilização do GPS no controle da qualidade de carta. *Anais do Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário*, 41–48.
- Guimarães, M. J. M., Santos, A. C. S., Silva, A. S., Ribeiro, D. P., Barros, J. R. A., & Lopes, I. (2025). Mapeamento topográfico com aeronave remotamente pilotada para fins de georreferenciamento de propriedades rurais. *Revista de Geociências do Nordeste*, 11(1), 42–57. <https://doi.org/10.21680/2447-3359.2025v11n1ID34481>
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2025). *Modelo para conversão de altitudes geométricas (dadas pelos GNSS) em altitudes físicas*. <https://www.ibge.gov.br/geociencias/modelos-digitais-de-superficie/modelos-digitais-de-superficie/31283-hgeohnor2020-modeloconversaoaltitudesgeometricasgnss-datumverticalsgb.html>
- Jensen, J. R. (2009). *Sensoriamento remoto do ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres* (J. C. N. Epiphany, Trad.). Parênteses.
- Luhmann, T., Robson, S., Kyle, S., & Boehm, J. (2019). *Close-range photogrammetry and 3D imaging* (3a ed.). De Gruyter.
- McGlone, J. C. (Ed.). (2004). *Manual of photogrammetry* (5a ed.). American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Menezes, L. S., Santos, M. R. R., & Senra, A. S. (2019). Fotointerpretação obtida por Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) aplicada em mapeamento litoestrutural de escala 1:800, Afloramento do Domínio Macururé, Município de Capela – SE. *Revista Geociências (UNESP)*, 38(2), 483–493.
- Merchant, D. C. (1982). Spatial accuracy standards for large scale line maps. *Technical Papers of the American Congress on Surveying and Mapping*, 1, 222–231.
- MIKHAIL, E.; ACKERMAN, F. *Observations and Least Squares*. University Press of America, 1976. 497 p.
- Monico, J. F. G. (2008). *Posicionamento pelo GNSS: Descrição, fundamentos e aplicações* (2a ed.). Editora Unesp.
- Monico, J. F. G., Dal Poz, A. P., Galo, M., Santos, M. C., & Oliveira, L. C. (2009). Acurácia e precisão: Revendo os conceitos de forma acurada. *Boletim de Ciências Geodésicas*, 15(3), 469–483.

- Munaretto, L. (2020). *Vant e drones: A aeronáutica ao alcance de todos* (3a ed.). Edição do autor.
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Pedreira, W. J. P., Oliveira, J. A., & Santos, P. S. (2020). Avaliação da acurácia altimétrica usando a tecnologia VANT. *Revista Caminhos de Geografia*, 21(73). <https://doi.org/10.14393/RCG217348071>
- Santos, A. P., Rodrigues, D. D., Santos, N. T., & Junior, J. G. (2016). 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*, 22(4), 630–650. <https://doi.org/10.1590/S1982-21702016000400036>
- Santos, D. B., Souza, E. P., Silva, M. G., Teixeira, N. N., Silva, T. M., & Michel, R. F. M. (2025). Avaliação da acurácia de mapeamento planimétrico executado por aeronaves remotamente pilotadas para fins de caracterização de linhas de costa. *Revista de Gestão e Secretariado*, 16(8), 1–29. <https://doi.org/10.7769/gesec.v16i8.5170>
- Shapiro, S. S., & Wilk, M. B. (1965). An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, 52(3/4), 591–611.
- Silva, L. S., Zanoni, V. A. G., Pazos, V. C., Santos, L. M. A., & Jucá, T. R. P. (2022). *Fotogrametria com imagens adquiridas com drones: Do plano de voo ao modelo 3D*. Editora Universidade de Brasília.
- Teixeira, N. N., Cruz Júnior, D. C., & Galvão, L. A. (2022). Análise do desempenho de mapeamento topográfico planimétrico executado com Aeronave Remotamente Pilotada – RPA. *Sodebrás*, 17, 45–57. <https://doi.org/10.29367/issn.1809-3957.17.2022.204.45>
- Teixeira, N. N., Cruz Júnior, D. C., & Galvão, L. A. (2025). Aplicação do Decreto-Lei 89.817/ET-ADGV na avaliação da acurácia posicional de mapeamento urbano executado com Aeronave Remotamente Pilotada. *Revista de Direito da Cidade*, 17(3), 172–204. <https://doi.org/10.12957/rdc.2025.75106>
- Teixeira, N. N., Santos, M. S. T., Souza, R. P., Lima, C. A., Cruz Júnior, D. C., & Lima, J. S. (2024). Análise do desempenho de mapeamento planialtimétrico topográfico executado com Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) para fins de caracterização de zonas de praia. *Contribuciones a las Ciencias Sociales*, 17(1), 3750–3782. <https://doi.org/10.55905/revconv.17n.1-223>
- Tuler, M., & Saraiva, S. (2016). *Fundamentos de geodésia e cartografia* (1a ed.). Bookman.
- Vitti, D. M. C., Mauad, F. F., Marques, J., Inocêncio, A., & Veronez, M. R. (2018). Análise direcional de erros sistemáticos em ortomosaico gerado por meio de ARP. *Revista Brasileira de Cartografia*, 70(número especial), 1566–1594.
- Wolf, P. R., & Dewitt, B. A. (2014). *Elements of photogrammetry with applications in GIS* (4th ed.). McGraw-Hill.