

INGLITH DE SOUZA LAGE ALVES

**SISTEMA GNSS-RTK DE BAIXO CUSTO EM VEÍCULOS AÉREOS NÃO
TRIPULADOS PARA APLICAÇÕES NA AGRICULTURA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Flora Maria de Melo Villar

Coorientador: Domingo Sárvio Magalhães Valente

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2021**

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade Federal de Viçosa - Campus Viçosa

T

A474s
2021
Alves, Inglith de Souza Lage, 1996-
Sistema GNSS-RTK de baixo custo em veículos aéreos não tripulados para aplicações na agricultura / Inglith de Souza Lage Alves. – Viçosa, MG, 2021.
50 f. : il. ; 29 cm.

Orientador: Flora Maria de Melo Villar.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Sensoriamento remoto. 2. Sistema de Posicionamento Global. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 621.3678

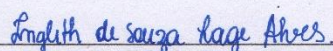
INGLITH DE SOUZA LAGE ALVES

**SISTEMA GNSS-RTK DE BAIXO CUSTO EM VEÍCULOS AÉREOS NÃO
TRIPULADOS PARA APLICAÇÕES NA AGRICULTURA**

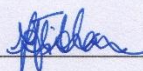
Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 8 de março de 2021.

Assentimento:



Inglith de Souza Lage Alves
Autora



Flora Maria de Melo Villar
Orientadora

Aos meus pais José Geraldo e Renata Aparecida
pelo incentivo, compreensão e amor ...

Dedico.

AGRADECIMENTOS

É gratificante a finalização de mais uma etapa da minha vida e o mais importante é saber que, durante ela, nunca estive sozinha. Logo, não poderia deixar de agradecer aos que incentivaram e, de alguma forma, tornaram mais fácil e agradável minha caminhada. Primeiramente, agradeço a Deus por sua infinita fidelidade e por me conceder sabedoria para finalizar este trabalho em um tempo de isolamento social.

À Universidade Federal de Viçosa e ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade e apoio durante toda minha formação.

Em especial, à Professora Flora Maria de Melo Villar por toda a amizade, disponibilidade e orientação durante os dois anos do curso. Foi extremamente construtivo conviver e ter a oportunidade de ser orientada por alguém que representa bem a mulher dentro da ciência.

Ao coorientador Professor Domingos Sárvio Magalhães Valente pelo conhecimento compartilhado, pela indicação do tema deste trabalho e auxílio na construção da metodologia.

Ao Professor Elpídio por aceitar o convite para participar da banca.

Aos meus pais, Renata Aparecida e José Geraldo, por todo o amor e incentivo ao longo de toda vida. As mensagens diárias de apoio renovavam minhas energias. Obrigada por nunca desistirem de mim.

Aos meus irmãos, Marcelo e Gustavo, por todo o amor que recebi a cada retorno. Aos meus avós e familiares por todas as manifestações de carinho.

Aos amigos de infância e aos construídos ao longo da vida, agradeço por sempre acreditarem em mim. As amizades feitas no Laboratório de Mecanização Agrícola (LMA), agradeço pela convivência saudável. Agradeço ao Marcelo, Pedro, Poliana, André e Igor pelo auxílio durante a coleta dos meus dados.

Por fim, agradeço a todos os professores e funcionários da Universidade Federal de Viçosa por contribuírem na minha formação.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Controle suas emoções, discipline sua mente.”
(Severo Snap)

BIOGRAFIA

INGLITH DE SOUZA LAGE ALVES, filha de Renata Aparecida Lage de Souza Alves e José Geraldo Alves, nasceu em Coronel Fabriciano, Minas Gerias, no dia 14 de fevereiro de 1996. Em fevereiro de 2019, concluiu o curso de Bacharel em Engenharia de Agrimensura e Cartográfica na Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Campus de Monte Carmelo. Em março de 2019, iniciou o curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola com a linha de pesquisa em Agricultura de Precisão na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de dissertação em março de 2021.

RESUMO

ALVES, Inglith de Souza Lage, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, março de 2021. **Sistema GNSS-RTK de baixo custo em veículos aéreos não tripulados para aplicações na agricultura.** Orientadora: Flora Maria de Melo Villar. Coorientador: Domingos Sárvio Magalhães Valente.

O mercado da tecnologia fotogramétrica e de posicionamento oferece modelos de câmeras e receptores com variações na precificação de forma a atender diferentes públicos e demandas. Atualmente, testes de equipamentos de baixo custo estão sendo realizados com o intuito de ampliar a utilização da tecnologia, tornando-a acessível. Os receptores GNSS de simples frequência, presentes nos VANTs (veículos aéreos não tripulados) de menor precificação, estão sendo submetidos a testes estáticos e cinemáticos para a verificação da qualidade da precisão do posicionamento. Receptores capazes de estimar coordenadas por meio do método de posicionamento relativo com correção em tempo real (*Real Time Kinematic - RTK*) apresentam alta precisão nas observações e também estão disponíveis em versões de baixo custo. Também podem obter resolução competitiva de ambiguidade e desempenho de posicionamento para os receptores de frequência dupla de alto custo. Os VANTs comercializados com receptores RTK já embarcados possuem alto valor aquisitivo. Estes oferecem ao usuário a possibilidade do georreferenciamento das imagens coletadas com o menor número possível de pontos de controle. O rastreamento dos pontos de controle no terreno é um fator que inibe as vantagens da utilização de VANTs em regiões de difícil acesso, como em áreas florestais, densas vegetações ou com processos erosivos. Dessa forma, esse trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho dos receptores GNSS-RTK de baixo custo no modo estático, cinemático e também sua precisão para o georreferenciamento de ortoimagens. Para atender o primeiro objetivo, foi inserido no VANT modelo Matrice 100 o GNSS-RTK. Na área experimental foram alocadas 24 estacas e um ponto foi escolhido como base para que a correção via rádio fosse possível. O posicionamento estático foi avaliado por meio da comparação da coordenada obtida com o sistema GNSS-RTK e da coordenada coletada com o receptor geodésico Topmap TPS T10. O posicionamento cinemático foi avaliado por meio da comparação dos valores das coordenadas dos pixels centrais das imagens coletadas a 60 metros de altura. Os dados estáticos apresentaram, em sua maioria, precisão centimétrica e os dados cinemáticos precisão métrica. Para atender ao segundo objetivo, pontos de controle e de validação foram escolhidos ao longo da área experimental. Foram realizados voos a 40, 60 e 80 metros de altura. Com o auxílio de softwares de planejamento e processamento, as imagens foram georreferenciadas com diferentes números de pontos de controle e a precisão

de cada resultado foi avaliada por meio dos pontos de validação. Os resultados demonstram que quanto maior a altura de voo, menor a precisão. Portanto, quanto maior o número de pontos de controle no georreferenciamento, melhor a qualidade da interpolação e, assim, os pontos analisados se aproximam dos valores ideais.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. *Global Navigation Satellite System*. *Real Time Kinematic*.

ABSTRACT

ALVES, Inglith de Souza Lage, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, March 2021. **Low cost GNSS-RTK system in unmanned aerial vehicles for agricultural applications**. Advisor: Flora Maria de Melo Villar. Co-advisor: Domingos Sárvio Magalhães Valente

The market for photogrammetric and positioning technology offers models of cameras and receivers with variations in pricing in order to meet different audiences and demands. Currently, tests of low-cost equipment are being carried out in order to expand the use of technology, making it accessible. The GNSS receivers of simple frequency, present in the UAVs (unmanned aerial vehicles) of lower pricing, are being subjected to static and kinematic tests to verify the quality of the positioning accuracy. Receivers capable of estimating coordinates using the relative positioning method with real-time correction (Real Time Kinematic - RTK) have high precision in the observations. These receivers with real-time correction capability are also available in the low-cost version. They can also achieve competitive resolution of ambiguity and positioning performance for high-cost dual frequency receivers. UAVs sold with RTK receivers already shipped have a high acquisition value. These offer the user the possibility of geo-referencing the images collected with the fewest possible control points. The tracking of control points on the ground is a factor that inhibits the advantages of using UAVs in regions of difficult access, such as in forest areas, dense vegetation or with erosion processes. Thus, this work aimed to evaluate the performance of low-cost GNSS-RTK receivers in static, kinematic mode and also their accuracy for the georeferencing of orthoimages. In order to meet the first objective, the GNSS-RTK UAV model was inserted in the UAV model Matrix. In the experimental area, 24 stakes were allocated and a point was chosen as the basis for radio correction to be possible. Static positioning was assessed by comparing the coordinate obtained with the GNSS-RTK system and the coordinate collected with the Topmap TPS T10 geodetic receiver. The kinematic positioning was evaluated by comparing the coordinate values of the central pixels of the images collected at 60 meters. The static data presented, in their majority, centimetric precision and the kinematic data metric precision. To meet the second objective, control and validation points were chosen throughout the experimental area. Flights were performed at 40, 60 and 80 meters in height. With the aid of planning and processing software, the images were georeferenced with different numbers of control points and the accuracy of each result was assessed using the validation points. The results demonstrate that the higher the flight height, the lower the accuracy. Therefore, the greater the number of control points in the georeferencing, the better the quality of the interpolation and, thus, the analyzed points

approach the ideal values.

Keywords: Remote sensing. Global Navigation Satellite System. Real Time Kinematic.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	
122		
1.1	REFERÊNCIAS	144
2	ARTIGO I - AVALIAÇÃO DA PRECISÃO E ACURÁCIA DE UM SISTEMA GNSS-RTK DE BAIXO CUSTO	166
	RESUMO	166
	ABSTRACT	177
2.1	INTRODUÇÃO.....	188
2.2	MATERIAL E MÉTODOS.....	19
2.2.1	Método de aquisição dos dados e avaliação do posicionamento estático.....	19
2.2.2	Método de aquisição dos dados e avaliação do posicionamento cinemático	22
2.3	RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
2.4	CONCLUSÃO.....	29
2.5	REFERÊNCIAS	30
3	ARTIGO II - AVALIAÇÃO DO GEORREFERENCIAMENTO DE IMAGENS COM O USO DE UM SISTEMA GNSS-RTK DE BAIXO CUSTO.....	32
	RESUMO	32
	ABSTRACT	33
3.1	INTRODUÇÃO.....	34
3.2	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.2.1	Área de Estudo e dados de referência.....	35
3.2.2	Aquisição e processamento de dados fotogramétricos	37
3.2.3	Avaliação da Qualidade das Imagens	38
3.3	RESULTADOS	39
3.4	CONCLUSÃO.....	47
3.5	REFERÊNCIAS	48
4	CONCLUSÃO GERAL	50

1 INTRODUÇÃO GERAL

O uso de informações geoespaciais de origem do sistema de posicionamento por satélite (GNSS - *Global Navigation Satellite System*) agregou nos trabalhos de diferentes setores, influenciando em avanços científicos, sociais e econômicos na sociedade moderna. Por ser uma tecnologia multidisciplinar, as informações geoespaciais ganharam espaço dentro das operações agrícolas. Um receptor GNSS é um importante sensor para a aplicação das técnicas da agricultura de precisão (KESKIN; SEKERLI; KAHRAMAN, 2017).

Em 2000, após o ajuste do erro de disponibilidade do sistema de posicionamento norte-americano (GPS - *Global Positioning System*), as diferentes tecnologias que foram desenvolvidas ganharam confiabilidade das informações espaciais coletadas pelos receptores (EL ABOUS; SAMANTA, 2017). Dentre as tecnologias desenvolvidas, destacam-se os veículos aéreos não tripulados (VANTS). Os VANTS são plataformas destinadas à coleta de informações remotas com capacidade de aquisição de imagens aéreas e dados geográficos, simultaneamente. As imagens quando coletadas com alta resolução temporal e espacial gera independência e facilidade na aquisição dos dados aos usuários (ELING; KLINGBEIL; KUHLMANN, 2014).

Os VANTS, por meio da combinação do uso de sensores fotogramétricos, técnicas de sensoriamento remoto e dados de posicionamento, são utilizados em diferentes atividades de mapeamento. Assim como técnicas de sensoriamento remoto são utilizadas para auxiliar nas práticas da agricultura de precisão (GUERRA-HERNÁNDEZ et al., 2018). Alguns estudos, como os realizados por Persson (2018) e Carvalho-Santos et al. (2018), apresentam metodologias para a estimativa de altura da planta, volume, área folhear e análises ambientais com o uso de imagens. Estas metodologias podem ser aplicadas com maior precisão com o uso de VANTS (GUERRA-HERNÁNDEZ, 2017).

O georreferenciamento de dados de sensoriamento remoto consiste em determinar coordenadas para os pixels de uma imagem. Para os estudos que exigem precisão no dimensionamento por imagem e também em modelagens 3D, realiza-se o georreferenciamento. O georreferenciamento de imagens suborbitais é dependente do uso de pontos de controle no solo (NEIGH et al., 2014). Estes são obtidos por meio de equipamentos que coletam informações do sistema GNSS. Porém, essa dependência contraria as vantagens da utilização do sensoriamento remoto nas práticas da agricultura de precisão (TOMAŠTÍK et al., 2019).

O empenho para eliminar esta dependência pode ser percebido, em especial, no uso e desenvolvimento crescentes de metodologias de fotogrametria digital (TOMAŠTÍK et al.,

2019). Os VANTs são capazes de transportar diferentes sensores, entre eles sensores multi ou hiperespectrais, sistemas de localização e scanners a laser. Este conjunto de sensores, em um trabalho simultâneo, se apresentam com uma alternativa para eliminar a dependência da coleta de pontos de controle (RABAH *et al.*, 2018).

Uma alternativa para a eliminação do uso de pontos de controle é a correção dos dados de posicionamento. Esses dados podem ser corrigidos em tempo real ou após o levantamento. Atualmente, o uso dos sistemas de posicionamento com correção em tempo real (*Real Time Kinematic* – RTK), presente em receptores de frequência L1/L2, são adicionados nos VANTs como medida de solução precisa para as dificuldades da aquisição de pontos de controle (SKOGLUND *et al.*, 2016).

Uma das formas de correção do posicionamento em tempo real requer dois receptores com função de comunicação por *link* de rádio, um atuando como base em coordenadas conhecidas, e outro instalado no VANT (GARRIDO-CARRETERO *et al.*, 2019). O desafio é a aplicação do método de correção RTK utilizando receptores de baixo custo com antenas de simples frequência. O mercado, devido ao avanço da tecnologia de posicionamento, oferece modelos de receptores e antenas de variados preços e fins de utilização. A utilização dos receptores de baixo custo tem intuito de ampliar a utilização da tecnologia com o método de correção, tornando-a acessível (UYSAL; TOPRAK; POLAT, 2015).

Alguns receptores de baixo custo com a aplicação de antenas de frequência L1 proporcionam precisão similar aos geodésicos (TAKASU; YASUDA, 2009). Ainda, os receptores RTK de frequência L1 de baixo custo podem obter resolução competitiva de ambiguidade e desempenho de posicionamento para os receptores de frequência dupla de alto custo (GARRIDO-CARRETERO *et al.*, 2019).

Com o presente trabalho, propôs-se o uso de um GNSS/RTK de baixo custo acoplado a um VANT com o intuito de avaliar seu desempenho para fins de mapeamento aéreo. No primeiro artigo foi avaliada a precisão dos receptores na coleta de pontos de controle e na orientação do VANT. Já no segundo artigo, verificou-se o desempenho do sistema GNSS-RTK no georreferenciamento de imagens com o número reduzido de pontos de controle.

1.1 REFERÊNCIAS

BORGOGNO MONDINO, E.; GAJETTI, M. Preliminary considerations about costs and potential market of remote sensing from UAV in the Italian viticulture context. *European Journal of Remote Sensing*, v. 50, n. 1, p. 310–319, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1328269>>.

DABOVE, Paolo; MANZINO, Ambrogio M. Artificial neural network for detecting incorrectly fixed phase ambiguities for L1 mass-market receivers. *GPS Solutions*, v. 21, n. 3, p. 1213–1219, 2017.

FREELAND, Robert et al. Agricultural drainage tile surveying using an unmanned aircraft vehicle paired with Real-Time Kinematic positioning—A case study. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 165, n. September 2018, p. 104946, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104946>>.

GARRIDO-CARRETERO, María S. et al. Low-cost GNSS receiver in RTK positioning under the standard ISO-17123-8: A feasible option in geomatics. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 137, p. 168–178, 2019.

HE, Xiaoxing et al. Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources. *Journal of Geodynamics*, v. 106, p. 12–29, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2017.01.004>>.

KARPIK, A. P.; LIPATNIKOV, L. A. Combined application of high precision positioning methods using GLONASS and GPS signals. *Gyroscope and Navigation*, v. 6, n. 2, p. 109–114, 2015.

KESKIN, Muharrem; SAY, Sait M.; GÖRÜCÜ KESKIN, Serap. Evaluation of a low-cost GPS receiver for precision agriculture use in adana province of Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, v. 33, n. 1, p. 79–88, 2009.

KESKIN, Muharrem; SEKERLI, Yunus Emre; KAHRAMAN, Suleyman. Performance of two low-cost GPS receivers for ground speed measurement under varying speed conditions. *Precision Agriculture*, v. 18, n. 2, p. 264–277, 2017.

LI, Tuan et al. High-accuracy positioning in urban environments using single-frequency multi-GNSS RTK/MEMSIMU integration. *Remote Sensing*, v. 10, n. 2, 2018.

MAES, Wouter H.; STEPPE, Kathy. Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. *Trends in Plant Science*, v. 24, n. 2, p. 152–164, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007>>.

MULLA, David J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, v. 114, n. 4, p. 358–371, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>>.

RABAH, M. et al. Using RTK and VRS in direct geo-referencing of the UAV imagery. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, v. 7, n. 2, p. 220–226, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2018.05.003>>.

TAKASU, Tomoji; EBINUMA, Takuji; YASUDA, Akio. Effect of Quasi Zenith Satellite (QZS) on GPS Positioning 2 . Simulation and Evaluation. p. 2–6, 2009.

TAKASU, Tomoji; YASUDA, Akio. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. International Symposium on GPS/GNSS, n. January 2009, p. 4–6, 2009.

TOMAŠTÍK, Julián et al. UAV RTK/PPK method-An optimal solution for mapping inaccessible forested areas? Remote Sensing, v. 11, n. 6, 2019a.

TOMAŠTÍK, Julián et al. UAV RTK/PPK Method—An Optimal Solution for Mapping Inaccessible Forested Areas? Remote Sensing, v. 11, n. 6, p. 721, 2019b.

COELHO, Luiz; BRITO, Jorge Nunes. Fotogrametria Digital. [S.l.: s.n.], 2007.

EL ABOUSS, Abdellah; SAMANTA, Nel. A modeling of GPS error distributions. 2017 European Navigation Conference, ENC 2017, p. 119–127, 2017.

ELING, C.; KLINGBEIL, L.; KUHLMANN, H. Development of an RTK-GPS system for precise real-time positioning of lightweight UAVs. Ingenieurvermessung, n. i, p. 1–12, 2014. Disponível em: <http://www.ipb.uni-bonn.de/projects/MoD/literatur/pdf/p1-2014_Eling_Development.pdf>.

KESKIN, Muharrem; SEKERLI, Yunus Emre; KAHRAMAN, Suleyman. Performance of two low-cost GPS receivers for ground speed measurement under varying speed conditions. Precision Agriculture, v. 18, n. 2, p. 264–277, 2017.

MOUSAZADEH, Hossein. A technical review on navigation systems of agricultural autonomous off-road vehicles. Journal of Terramechanics, v. 50, n. 3, p. 211–232, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jterra.2013.03.004>>.

ODOLINSKI, Robert; TEUNISSEN, Peter J.G. Single-frequency, dual-GNSS versus dual-frequency, single-GNSS: a low-cost and high-grade receivers GPS-BDS RTK analysis. Journal of Geodesy, v. 90, n. 11, p. 1255–1278, 2016.

SUN, H. et al. RTK GPS mapping of transplanted row crops. Computers and Electronics in Agriculture, v. 71, n. 1, p. 32–37, 2010.

UYSAL, M.; TOPRAK, A. S.; POLAT, N. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, v. 73, p. 539–543, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.010>>.

2 ARTIGO I – SISTEMA GNSS-RTK DE BAIXO CUSTO PARA O GEORREFERENCIAMENTO DE TERRENO COM VEÍCULOS AÉREOS NÃO TRIPULADOS

RESUMO

Os veículos aéreos não tripulados (VANTs) são plataformas de sensoriamento remoto que fazem a tomada da imagem em variadas altitudes, mostrando-se uma alternativa de grande potencial para aquisição de dados geoespaciais remotos. Se associada à técnica fotogramétrica, com dados de posicionamentos corrigidos e precisos, os resultados obtidos e os produtos gerados remotamente ganham qualidade e diminuem o esforço da coleta de dados em campo. Porém, os equipamentos que contemplam o VANT e o GNSS, com capacidade de correção em tempo real, são de alto custo de aquisição se comparados à sensores mais simples. Dessa forma, objetivou-se com esse trabalho avaliar o desempenho do uso do sistema GNSS RTK de baixo custo acoplado a um VANT para apoio ao georreferenciamento de imagens e para a coleta de pontos no terreno. Para a validação do potencial de uso do equipamento para fins de coleta de pontos de controle, 24 estacas foram distribuídas na área experimental. Avaliou-se o posicionamento estático, que teve como parâmetro de comparação os dados de coordenadas obtidos com um receptor geodésico de dupla frequência. Com o sistema GNSS-RTK- a bordo do VANT, os dados coletados foram comparados com os dados de posição do receptor de simples frequência presente no VANT. Os cálculos das variações das coordenadas e a raiz quadrada do erro médio dos pontos de controle na forma estática foi realizado. Os mesmos cálculos foram realizados para quando o sistema GNSS-RTK estava acoplado ao VANT em seu modo cinemático com correção em tempo real, em um voo de 60 metros de altura. Os dados estáticos apresentaram, em sua maioria, precisão centimétrica e os dados cinemáticos precisão métrica.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto. Global Navigation Satellite System. Real Time Kinematic

ABSTRACT

Unmanned aerial vehicles (UAVs) are remote sensing platforms that take the photo at various altitudes, showing an alternative of great potential for acquiring remote geospatial data. If associated with the photogrammetric technique, with corrected and accurate positioning data, the results obtained and the products generated remotely gain quality and reduce the effort of collecting data in the field. However, equipment that includes UAV and GNSS with real-time correction capability is expensive to acquire compared to simpler sensors. Thus, the objective of this work was to evaluate the performance of using the low-cost GNSS RTK system coupled with a UAV to support the georeferencing of images and to collect points on the ground. For the validation of the potential use of the equipment for the purpose of collecting control points, 24 cuttings were distributed in the experimental field. Static positioning was evaluated, using the coordinate data obtained with a dual frequency geodetic receiver as a comparison parameter. With the GNSS-RTK- system on board the UAV, the collected data were compared with the position data of the single frequency receiver present in the UAV. The calculations of the variations of the coordinates and the mean square root of the control point coordinates in static form were performed and, subsequently, t calculated for when the GNSS-RTK system was coupled to the UAV in its kinematic mode with real-time correction in a flight. 60 meters. The static data presented, in their majority, centimetric precision and the kinematic data metric precision.

Keywords: Remote sensing. Global Navigation Satellite System. Real Time Kinematic

2.1 INTRODUÇÃO

Receptores do Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) são importantes sensores usados no setor agrícola, principalmente na aplicação das técnicas da agricultura de precisão. A utilização das tecnologias de posicionamento na agricultura melhoram as condições de trabalho em campo, a distribuição e uso dos recursos e preservação ambiental. (Perez-Ruiz et al., 2014). O GNSS na agricultura auxilia no tratamento diferenciado das lavouras. Com dados georreferenciados a área pode ser dividida em zonas de manejo para receber tratamentos gerais ou pontuais. Os tratamentos podem resultar em uma significativa redução dos impactos ambientais visto que a aplicação de insumos é precisa e adequada (MULLA, 2013).

Um dos impasses do uso das técnicas de agricultura de precisão é o valor de aquisição dos equipamentos (Bechar e Vigneault, 2017). Os receptores GNSS mais eficientes do mercado possuem altos custos devido à capacidade de coleta de informações de boa qualidade posicional. (RABAH et al., 2018). Nos processos que exigem maior precisão dos dados planialtimétricos, são utilizados receptores com capacidade de coleta nas frequências L1 e L2. No entanto, receptores de baixo custo, com antenas de frequência L1 podem proporcionar precisão similar aos receptores geodésicos, se usados em boas condições, como concluíram Takasu; Ebinuma; Yasuda (2009).

As dificuldades para a aquisição de coordenadas com alta precisão são um dos entraves das técnicas de sensoriamento remoto. O controle de máquinas no campo e mapeamentos aéreos necessitam de informações de elevada qualidade. Os receptores GNSS de frequência simples, quando possuem capacidade de coleta de coordenadas com boa precisão, podem ser uma opção para se utilizar na agricultura, principalmente em países em desenvolvimento (KESKIN; SEKERLI; KAHRAMAN, 2017).

Para que os dados coletados possam ter boa precisão, são utilizadas técnicas de correção, com o intuito de minimizar possíveis erros do sistema. A correção pode ser feita no método pós-processado ou em tempo real. O sistema Real Time Kinematic (RTK) é um método relativo de posicionamento em tempo real, que consiste em determinar as coordenadas de um ponto de acordo com a estação de referência. As medições GNSS da estação de referência e suas coordenadas são transmitidas para a estação móvel em tempo real via rádio.

No método de correção em tempo real a fase da onda portadora é enviada pelos satélites e recebidas pelos receptores GNSS. Os dados, se recebidos sem interferências e corrigidos, proporcionam um posicionamento com alta precisão e acurácia. A desvantagem do uso deste método é a distância máxima entre o radiotransmissor na base e o receptor, base e rover.

A mensuração da fase da onda portadora é representada por um número inteiro de ciclos mais uma fração de um ciclo. O desconhecimento dessa fração acarreta erros no posicionamento. Para que o sistema funcione dentro das condições ideais é necessário determinar corretamente o número inteiro de ciclos que possui a fase portadora. Esse processo é denominado resolução da ambiguidade. Quando o sistema chega na resolução da ambiguidade, o receptor GNSS aponta um status *fix*, caso contrário, *float*. Por outro lado, quando o sistema não consegue a comunicação entre os receptores, determina a posição sem nenhuma correção. (VALENTE et al., 2020).

Com o uso do RTK, pode-se obter precisão centimétrica ou até milimétrica após resolução correta das ambiguidades da fase da onda portadora (LI et al., 2018). Em ambientes abertos a resolução pode ser alcançada facilmente por receptores de dupla frequência, porém, há o inconveniente do elevado custo de aquisição (HE et al., 2017). O aumento do número de satélites e receptores possibilitou que receptores de simples frequência alcançassem a resolução da ambiguidade. Porém, esses receptores têm menor confiabilidade e levam mais tempo para alcançar a resolução da ambiguidade. (MONTENBRUCK et al., 2014).

Apesar do bom desempenho esperado de receptores GNSS RTK de baixo custo a averiguação da precisão das variáveis coletadas é necessária. Os questionamentos sobre a validação de equipamentos de baixo custo trazem a necessidade de novos estudos visando testar novas metodologias de aplicabilidade. Assim, objetivou-se com esse estudo avaliar o uso de um receptor GNSS-RKT de baixo custo, nos modos estático e cinemático, visando validar sua aplicabilidade no georreferenciamento de imagens suborbitais.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

As imagens e dados de campo foram coletados no campo experimental Diogo Alves de Melo da Universidade Federal de Viçosa, latitude 20°46'4,39" e longitude 42°52'11,39", no município de Viçosa no estado de Minas Gerais. A área utilizada para o experimento possui 0,22 ha e 681 metros de perímetro. Na área foram distribuídas 24 estacas com o intuito de serem utilizadas como pontos de referência para a análise da qualidade dos dados coletados.

2.2.1 Método de aquisição dos dados e avaliação do posicionamento estático

Na área experimental foi alocada uma base utilizando o método por posicionamento relativo estático. As coordenadas de um objeto podem ser atribuídas com o receptor em repouso ou em movimento. No primeiro caso, trata-se de um posicionamento estático e, o segundo, cinemático. O tempo de ocupação da base foi de duas horas com o receptor geodésico GNSS

L1/L2 Topmap TPS T10. A taxa de coleta dos dados foi de 5 Hz, com máscara de elevação de 10°. O processamento dos dados da base foi feito pelo método de pós-processado, utilizando a base do IBGE presente dentro do Campus da Universidade Federal de Viçosa.

As estacas foram rastreadas pelo método RTK com o tempo de ocupação dos pontos de 20 segundos; a base (Figura 1) foi ocupada durante toda a etapa de aquisição. As coordenadas das estacas foram corrigidas com dados advindos da base.



Figura 1. Base alocada na área experimental. Fonte: Inglith de Souza Lage Alves (a autora)

O mesmo procedimento foi feito com o receptor GNSS-RTK de baixo custo. Porém, nesse caso, as estacas foram rastreadas com o equipamento por três dias seguidos, usando as mesmas configurações do receptor Topmap TPS T10. O módulo testado foi o Emlid Reach RTK, que possui capacidade de coleta de dados de simples frequência. Esse módulo possui 72 canais, sendo compatíveis com GPS / QZSS / L1 C / A, GLONASS G1, BeiDou B1, SBAS L1 C / A e Galileo E1. Além disso, usa um módulo de computador Intel® Edison integrado em um Ublox GNSS que suporta armazenamento, processamento, transferência de dados e comunicação wireless (Emlid Lda, 2018). O módulo Emlid Reach foi posicionado em cima de um tripé no modo base e fixado a um bastão para ser usado como rover (Figura 2). Durante as três repetições as coordenadas das estacas foram coletadas às 15 horas, do horário de Brasília, para menor influência ionosférica nos dados. Vale ressaltar que durante a aquisição dos dados o tempo permaneceu estável.

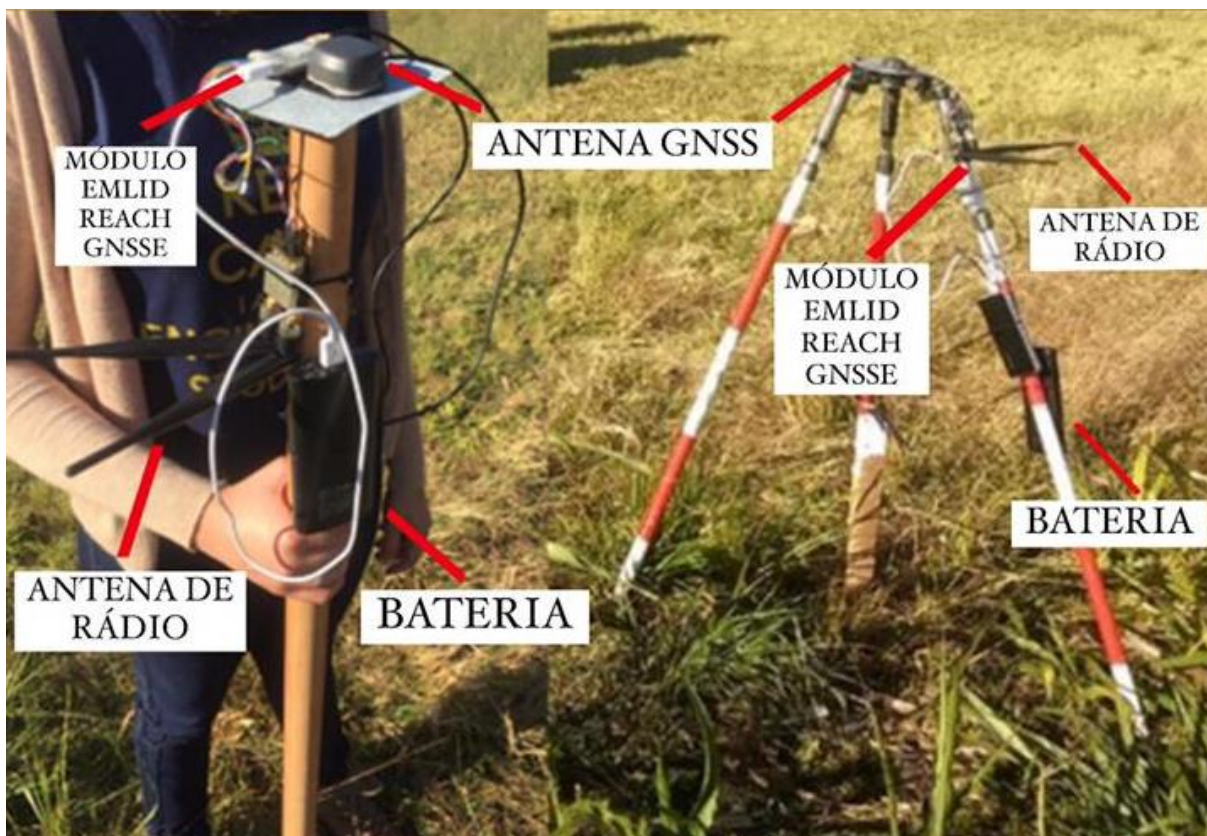


Figura 2. Base e *rover* do sistema GNSS-RTK. Fonte: Inglith de Souza Lage Alves (a autora)

Para a avaliação da precisão e acurácia do levantamento pelo método estático, foram calculadas a variação do valor da coordenada entre a posição de referência (pontos adquiridos com o Topmap TPS T10) e a observada e, a raiz quadrada do erro médio (Equação 1 e 2) a fim de avaliar a qualidade dos dados coletados com o sistema testado neste trabalho. As coordenadas nesta avaliação foram convertidas para a projeção UTM (Universal Transversa de Mercator) para que toda a estatística fosse calculada com a unidade métrica de medida. No que se refere a precisão, o termo tem relação com a variação do valor medido com redundância sob as mesmas condições em torno do valor médio observado. Já a acurácia, refere-se a exatidão da medida, em outras palavras, o quanto a medida se aproxima do valor real. Por este fato, a acurácia é diretamente afetada pela precisão, enquanto a precisão é somente influenciada pelos erros aleatórios da prática do sistema de posicionamento.

$$RMSE_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{PC} - X)^2}{n}} \quad (1)$$

$$RMSE_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{PC} - Y)^2}{n}} \quad (2)$$

em que,

$RMSE_X$ e $RMSE_Y$ - valor da raiz quadrada média no eixo X e Y, respectivamente;

X e Y – coordenadas do pixel central da imagem;

X_{PC} e Y_{PC} - valores das coordenadas coletadas pelo sistema GNSS-RTK;

n - número de estacas.

A estimativa do erro, calculada por meio das Equações 1 e 2, permite a avaliação do erro em duas dimensões. Assim, para estimar o erro planimétrico foi utilizada a Equação 3.

$$RMSE_{XY} = \sqrt{RMSE_X^2 + RMSE_Y^2} \quad (3)$$

O $RMSE_{xy}$ é um dos critérios de precisão planimétrica mais utilizados para nuvens de pontos e foi utilizado como principal parâmetro de comparação dos dados desse método (TOMAŠTÍK et al., 2019b). Todas as coordenadas foram coletadas em formato geográfico decimal e, posteriormente, convertidos em coordenadas UTM para aplicação destas equações.

2.2.2 Método de aquisição dos dados e avaliação do posicionamento cinemático

Para a avaliação do sistema GNSS-RTK em modo cinemático o equipamento foi embarcado a um VANT. O VANT utilizado foi um modelo Matrice 100 com asas rotativas quadricóptero elétrico. O VANT possui 40 minutos de autonomia de voo e seus motores possuem baixa rotação, garantindo maior torque e estabilidade; possui também estabilizadores de voo para controle de sua posição, tudo por meio do GNSS. O sistema de posicionamento integrado faz aquisição de dados dos sistemas GPS e GLONASS. O equipamento foi manuseado por meio de um controle remoto via comunicação de rádio, o que garantiu o monitoramento das linhas de voo, disparos da câmera, verificação do nível de bateria, descolamento e de todas as variáveis previamente planejadas no plano de voo.

O VANT foi adaptado com uma câmera multiespectral do modelo RedEdge-MX fabricada por MicaSense. A câmera RedEdge-MX possui cinco sensores que possuem a

capacidade de coletar dados nos seguintes comprimentos de ondas e largura de banda: azul (475 nm, banda de 20 nm), verde (560 nm, 20 nm), vermelho (668 nm, 10 nm), RedEdge (717 nm, 10 nm) e infravermelho próximo (840 nm, 40 nm). Cada um dos cinco sensores registrou imagens independentes. O sistema GNSS-RTK utilizado é composto por uma placa microcontroladora Intel Edison e antena GNSS, que realiza a aquisição das coordenadas do ponto. Também possui um modem de rádio RFD 900+ e uma antena de comunicação rádio, que possuem a função de comunicação com a estação base para a correção do posicionamento.

O sistema GNSS-RTK foi acoplado ao VANT por meio de adaptações simples que garantiram estabilidade ao receptor durante o voo. Além do módulo, duas antenas foram embarcadas, uma de comunicação de rádio e outra para obtenção do sinal GNSS. Para a alimentação de energia, uma bateria externa foi colocada na parte central do VANT para garantir que nenhuma parte da aerodinâmica fosse alterada (Figura 3).



Figura 3. VANT e o sistema GNSS-RTK embarcado. Fonte: Inglith de Souza Lage Alves (a autora)

O voo foi realizado após executados o planejamento e definidos alguns parâmetros, como altura de voo, porcentagem de sobreposição lateral e longitudinal, assim como o limite da área de estudo. O voo foi realizado com altura de 60 metros, 70% de sobreposição lateral e

80% de sobreposição longitudinal. Além do receptor GNSS-RTK, o sistema contou com o auxílio de outro receptor de simples frequência, já contido no VANT.

Durante o voo foram registradas 204 imagens. Cada imagem possui uma coordenada de pixel central e um conjunto de dados que compõem o arquivo de metadados. Um dos dados desse conjunto é a hora, minuto e segundo do registro da imagem. Essa imagem também é associada a um valor de coordenadas que foi registrada pelo receptor de simples frequência presente no VANT. Para a avaliação cinemática, as coordenadas adquiridas pelo receptor GNSS-RTK foram comparadas com as do pixel central da imagem por meio do horário de aquisição da imagem. Para o processamento das imagens, foram utilizadas as bandas vermelha, verde e azul.

As coordenadas de cada pixel central das imagens, coletadas durante o voo, foram consideradas como coordenadas de referência para os cálculos. E as coordenadas registradas pelo GNSS-RTK, foram consideradas como observadas. Todos os dados, conectados pelo horário, foram transferidos para bancos de dados para o cálculo da precisão do posicionamento. Cada pixel da imagem possui coordenadas (X_{PC}, Y_{PC}) coletados pelo receptor embarcado originalmente no VANT e outras coordenadas (X, Y) calculadas pelo receptor GNSS-RTK de baixo custo. Com estas observações foi possível estimar a precisão por meio do cálculo da variação da coordenada da referência com a observada e o erro médio quadrático (RMSE). O erro foi calculado para cada componente (Equações 1, 2 e 3).

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente trabalho teve a finalidade de comparar a precisão e acurácia do receptor GNSS-RTK Emlid Reach. A análise foi realizada com base nos dados dos posicionamentos de modo cinemático e estático. Na Figura 4 são apresentadas a localização das 24 estacas distribuídas de forma regular na área experimental, bem como a localização da base.



Figura 4. Distribuição de pontos amostrais (em branco) na área experimental e a base (em vermelho). Fonte: Google Earth Pro, 2020.

Os dados de referência do posicionamento estático foram realizados com o receptor Topmap TPS T10 e os dados cinemáticos adquiridos durante o voo. Na Tabela 1 são apresentados os valores pós processados e corrigidos do ponto da base do sistema de avaliação e suas precisões. As coordenadas são apresentadas na projeção UTM (*Universal Transversa de Mercator*). Ambos os valores tabelados, coordenadas e desvio padrão, estão na unidade métrica de medida. O desvio padrão representa o valor da dispersão da coordenadas calculadas após a correção, ou seja, a precisão encontrada com o pós processamento do conjunto dos dados rastreados.

Tabela 1. Coordenadas da base no sistema UTM Zona 23S projetado em SIRGAS2000

	N (m)	E (m)	Elevação (m)
Coordenadas	$7,702. 10^6$	$7,218. 10^5$	$6,528. 10^2$
Desvio padrão	$2,000. 10^{-3}$	$2,000. 10^{-3}$	$2,000. 10^{-3}$

N – eixo Norte (representa coordenada y no sistema cartesiano); E – eixo Leste (representa coordenada x no eixo cartesiano).

Nos três dias de observação dos dados estáticos, o receptor GNSS-RTK foi configurado com o valor de base coletado pelo receptor Topmap. A coordenada da base quando determinada

com o cálculo da média do posicionamento feito pelo receptor GNSS-RTK durante os 20 minutos não apresentou precisão satisfatória. Utilizando o receptor GNSS-RTK para determinar a coordenada da base, a variação dos eixos Norte e Leste chegaram a 1,18 metros. Este resultado indicou que o método de aquisição do valor da base por uma média das observações sem o pós-processamento não permitiu o melhor desempenho do sistema GNSS-RTK em termos de precisão e acurácia.

Após o cálculo das coordenadas foi realizada a média das observações dos três dias. As coordenadas foram convertidas para a projeção UTM (Universal Transversa de Mercator) para que toda a estatística fosse calculada com a unidade métrica de medida (Tabela 2). O eixo Norte (N) teve variação média mínima de 0,201 m e máxima de 0,387 m, valores próximos ao eixo Leste (E), que apresentou variação média mínima de 0,208 m e máxima de 0,396 m. A variação calculada representa o quanto as coordenadas estavam deslocadas do valor ideal. Os resultados apontaram que a variação mínima esperada era de 20,1 cm, máxima de 39,6 cm e média entre 22,2 e 25,4 cm. Ou seja, sempre que for feita uma observação estática, deve-se esperar uma acurácia pior que 20 cm.

Tabela 2. Resultado do cálculo da variação das coordenadas UTM na análise do método estático.

	ΔN (m)	ΔE (m)
Mínimo	0,201	0,208
Máximo	0,387	0,396
Média	0,222	0,254
Desvio Padrão	0,051	0,058
RMSE	0,333	0,320

N – eixo Norte (representa coordenada y no sistema cartesiano); E – eixo Leste (representa coordenada x no eixo cartesiano).

A acurácia absoluta do sistema para o método estático foi de 0,462 m, determinada pelo RMSE. Para os eixos X (eixo E em UTM) e Y (eixo N em UTM) a acurácia obtida foi de 0,333 e 0,320 m, respectivamente. Os erros estão dentro dos limites esperados para esta avaliação, visto que, em alguns pontos coletados, o sistema apontou uma solução *float* para a ambiguidade de 12,5 % dos dados. Quando isso ocorre, erros simétricos são esperados (Bakker et al., 2011; Bechar e Vigneault, 2017).

Na Tabela 3 são apresentados os resultados obtidos após análise dos dados cinemáticos. Para o posicionamento cinemático, de acordo com os resultados, a variação mínima esperada é de 1,551 m, máxima de 1,911 m e média entre 1,539 m e 1,787 m. Ou seja, sempre que for feita uma observação cinemática, deve-se esperar uma precisão superior a 1,551 m. O eixo Norte (N) teve variação média mínima de 1,551 m e máxima de 2,182 m, valores próximos ao eixo Leste (E), que apresentou variação média mínima de 0,763 m e máxima de 1,911 m. A variação das coordenadas para o método cinemático representa o quanto as coordenadas estavam deslocadas do valor ideal. Neste levantamento, 71,56% dos dados apresentaram solução *fix*. Quando os dados apresentaram solução *float* o eixo Norte (N) teve variação média de 4,328 m e 3,521 para o eixo Leste (E).

Tabela 3. Variação das coordenadas nos eixos Norte e Leste para análise do método cinemático

	ΔN (m)	ΔE (m)
Mínimo	1,551	0,763
Máximo	2,182	1,911
Média	1,787	1,539
Desvio Padrão	0,369	0,185
RMSE	2,502	2,422

N – eixo Norte (representa coordenada y no sistema cartesiano); E – eixo Leste (representa coordenada x no eixo cartesiano).

A acurácia absoluta do sistema para o método cinemático foi de 2,219 m, determinada pelo RMSE. Para os eixos X (eixo E em UTM) e Y (eixo N em UTM) a acurácia obtida foi de 2,502 e 2,422 m, respectivamente. Os valores de RMSE do sistema, quando avaliado no método cinemático, mesmo que métricos, são aceitáveis, visto que o GNSS de comparação que estava presente no VANT também possui precisão métrica.

Observou-se que, receptor GNSS-RTK de baixo custo, apresentou acurácia média inferior a 30 centímetros no posicionamento estático, para os três dias de observações. Segundo GARRIDO-CARRETERO et al. (2019) os receptores RTK de frequência L1 de baixo custo podem obter resolução competitiva de ambiguidade e desempenho de posicionamento para os receptores de frequência dupla. Logo, esperava-se uma melhor acurácia e precisão no posicionamento, visto que, trata-se de um receptor com capacidade de correção em tempo real pelo método RTK. Também foi observado nos resultados do levantamento estático uma

instabilidade da resolução da ambiguidade.

Quando os receptores apresentam solução *fix* para a ambiguidade, a precisão tem potencial de ser centimétrica pois, conseguem, mesmo que com dificuldade, resolver a ambiguidade quando em condições de posicionamento ideais e em bases de curtas distâncias (Dabove e Manzino, 2017). Porém, alguns dados apresentaram o estado *float* para a resolução da ambiguidade da fase da onda portadora. No estado *float* os receptores possuem precisão métrica.

Um fator que pode ter afetado o alcance de melhores resultados é a imprecisão da instalação da base na verificação do prumo no ponto exato. Os receptores de baixo custo e de simples frequência devem estar em condições ideais de posicionamento para seu melhor desempenho e, assim, aproximar-se da qualidade dos receptores geodésicos (Li et al., 2018).

Nesta análise, os pontos foram coletados com 20 segundos de rastreamento, prática muito usada quando se trata de um levantamento utilizando receptores com possibilidade de correção em tempo real. Caso a coleta de pontos com o Topmap T10 fosse realizada com duração de 20 segundos e o levantamento pelo sistema GNSS-RTK com maior tempo de observação no ponto, os resultados de precisão e de acurácia não teriam validade, visto que, não estaria sendo fiel à metodologia de comparação.

Na avaliação cinemática, em que o receptor GNSS-RTK foi embarcado ao VANT, o posicionamento também teve status *float*, porém em sua maioria *fix*. Em movimento constante, os receptores tendem a ter maior taxa de perda de sinal devido a interferências no trajeto (FREELAND et al, 2019). Já se esperava uma precisão inferior no método cinemático se comparado ao estático, visto que, o receptor estava em movimento, em uma diferença de 60 metros de altitude da base e, ainda, susceptível a influência da agitação e aerodinâmica do VANT.

O modo cinemático também pode ter sido influenciado pelo mal posicionamento da base. Vale ressaltar que, as coordenadas que foram usadas como referência nessa fase foram adquiridas com um receptor GNSS de simples frequência com um desvio padrão do posicionamento de até 3 metros, como descrito pelo fabricante. Logo, as coordenadas do modo cinemático foram comparadas com as referências do pixel central que não possui garantia de precisão do posicionamento. Uma alternativa para aumentar a eficiência do sistema e reduzir problemas com perda de comunicação da correção em tempo real (RTK) nos receptores de baixo custo, é a inserção de outros sensores, como LIDAR e Unidades de Medição Inercial (IMUs) (VALENTE et al., 2020).

2.4 CONCLUSÃO

O sistema GNSS-RTK de baixo custo mostrou bom potencial como receptor acessível para aquisição de coordenadas no terreno, obtendo precisão centimétrica. O sensor quando a bordo do VANT mostrou potencial para uso durante os voos, visto que esteve em constante funcionamento, coletando os dados de posicionamento e mantendo a comunicação via rádio, mesmo submetido a uma altura de 60 metros. Porém o sistema GNSS-RTK apresenta maiores erros quando comparado ao sistema convencional. A precisão métrica do sistema quando submetido ao método cinemático trouxe evidências da imprecisão do sistema GNSS-RTK.

2.5 REFERÊNCIAS

- BORGOGNO MONDINO, E.; GAJETTI, M. Preliminary considerations about costs and potential market of remote sensing from UAV in the Italian viticulture context. *European Journal of Remote Sensing*, v. 50, n. 1, p. 310–319, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1328269>.
- DABOVE, Paolo; MANZINO, Ambrogio M. Artificial neural network for detecting incorrectly fixed phase ambiguities for L1 mass-market receivers. *GPS Solutions*, v. 21, n. 3, p. 1213–1219, 2017.
- FREELAND, Robert *et al.* Agricultural drainage tile surveying using an unmanned aircraft vehicle paired with Real-Time Kinematic positioning—A case study. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 165, n. September 2018, p. 104946, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104946>.
- GARRIDO-CARRETERO, María S. *et al.* Low-cost GNSS receiver in RTK positioning under the standard ISO-17123-8: A feasible option in geomatics. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 137, p. 168–178, 2019.
- HE, Xiaoxing *et al.* Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources. *Journal of Geodynamics*, v. 106, p. 12–29, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2017.01.004>.
- KARPIK, A. P.; LIPATNIKOV, L. A. Combined application of high precision positioning methods using GLONASS and GPS signals. *Gyroscopy and Navigation*, v. 6, n. 2, p. 109–114, 2015.
- KESKIN, Muharrem; SAY, Sait M.; GÖRÜCÜ KESKIN, Serap. Evaluation of a low-cost GPS receiver for precision agriculture use in adana province of Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, v. 33, n. 1, p. 79–88, 2009.
- KESKIN, Muharrem; SEKERLI, Yunus Emre; KAHRAMAN, Suleyman. Performance of two low-cost GPS receivers for ground speed measurement under varying speed conditions. *Precision Agriculture*, v. 18, n. 2, p. 264–277, 2017.
- LI, Tuan *et al.* High-accuracy positioning in urban environments using single-frequency multi-GNSS RTK/MEMSIMU integration. *Remote Sensing*, v. 10, n. 2, 2018.
- MAES, Wouter H.; STEPPE, Kathy. Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. *Trends in Plant Science*, v. 24, n. 2, p. 152–164, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007>.
- MULLA, David J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, v. 114, n. 4, p. 358–371, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>.
- RABAH, M. *et al.* Using RTK and VRS in direct geo-referencing of the UAV imagery. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, v. 7, n. 2, p. 220–226, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2018.05.003>.

TAKASU, Tomoji; EBINUMA, Takuji; YASUDA, Akio. Effect of Quasi Zenith Satellite (QZS) on GPS Positioning 2 . Simulation and Evaluation. p. 2–6, 2009.

TAKASU, Tomoji; YASUDA, Akio. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. *International Symposium on GPS/GNSS*, n. January 2009, p. 4–6, 2009.

TOMAŠTÍK, Julián *et al.* UAV RTK/PPK method-An optimal solution for mapping inaccessible forested areas? *Remote Sensing*, v. 11, n. 6, 2019a.

3 ARTIGO II - LEVANTAMENTO DE TERRENO COM VEÍCULO AÉREO NÃO TRIPULADO UTILIZANDO GNSS-RTK DE BAIXO CUSTO.

RESUMO

O mapeamento de regiões de difícil acesso, topografia irregular ou de lavouras que possuem plantas com extensas copas é um desafio para o georreferenciamento de imagens. O georreferenciamento usualmente realizado envolve o uso de pontos de controle. As informações desses pontos são interpoladas e cada pixel recebe uma coordenada. A dependência de pontos de controle para a correção da orientação das imagens inibe as vantagens do mapeamento aéreo. Algumas técnicas de sensoriamento remoto visam solucionar este impasse. Os veículos aéreos não tripulados (VANTs), com o auxílio de receptores com métodos de correção em tempo real, são uma alternativa quando a técnica exige maiores precisões. Assim, objetivou-se com este trabalho testar o desempenho e avaliar a precisão do uso de um sistema GNSS RTK de baixo custo para o georreferenciamento de pontos no terreno. Pontos de controle e validação foram coletados no terreno. O sistema foi colocado a bordo de um VANT e realizados voos em diferentes alturas. As informações coletadas pelo receptor de baixo custo foi comparada com a solução que original. Foram geradas três ortoimagens para cada altura de voo (40, 60 e 80 m) utilizando zero, 3 e 5 pontos de controle. A precisão foi calculada por meio das equações de raiz quadrada média (RSME). Os dados do pixel referentes as estacas foram comparados com os dados coletados em campo. O resultado mais preciso foi obtido quando a ortoimagem foi georreferenciada com o maior número de pontos de controle, sendo essa precisão de 5 cm para a altura de voo de 40 m.

Palavras-chave: Agricultura de precisão. Sensoriamento remoto. *Global Navigation Satellite System. Real Time Kinematic*

ABSTRACT

The mapping of regions with difficult access, irregular topography or crops that have plants with extensive crowns is a challenge for the georeferencing of images. The georeferencing usually performed involves the use of control points. The information at these points is interpolated and each pixel receives a coordinate. The reliance on control points to correct the orientation of the images inhibits the advantages of aerial mapping. Some remote sensing techniques aim to resolve this impasse. Unmanned aerial vehicles (UAVs), with the aid of receivers with real-time correction methods, are an alternative when the technique requires greater precision. Thus, the objective of this work was to test performance and evaluate the accuracy of the use of a low cost GNSS RTK system. Control and validation points were collected on the ground. The system was placed on the edge of a UAV and flights were performed at different heights. The information collected by the low-cost receiver was compared with the original solution. Three orthoimages were generated for each flight height (40, 60 and 80 m) using zero, 3 and 5 control points. Precision was calculated using the mean square root equations (RSME). The pixel data related to the piles were compared with the data collected in the field. The most accurate result was found when the orthography was georeferenced with the largest number of control points, this precision being 5 cm for the flight height of 40 m.

Keywords: Remote sensing. Global Navigation Satellite System. Real Time Kinematic

3.1 INTRODUÇÃO

Na última década o potencial dos veículos aéreos não tripulados (VANTs) foi evidenciado em diferentes campos de aplicação. Parte do sucesso desta tecnologia é devida ao baixo custo de aquisição, facilidade de operação, maior taxa de aquisição de dados e independência aos usuários. As técnicas de fotogrametria aérea digital e sensoriamento remoto, antes utilizadas com maior frequência para fins científicos, atingiu um vasto uso operacional por meio da combinação dos VANTs e sensores de baixo custo (BORGOGNO MONDINO; GAJETTI, 2017).

Dentre os diferentes campos de aplicação, destaca-se o uso de VANTs nas operações agrícolas. A agricultura de precisão é um setor economicamente importante para comercialização dos VANTs (MULLA, 2013). As imagens capturadas oferecem dados de sensoriamento remoto de alta resolução espacial e temporal, de acordo com a necessidade da operação. Logo, a aquisição de dados em campo é realizada por meio da combinação do VANT com sensores fotogramétricos e posicionais no local, momento e intensidade desejados (MAES; STEPPE, 2019).

Uma das características da agricultura de precisão é não tratar homoganeamente a região de interesse. A área pode ser dividida em zonas para receber tratamentos ou também tratamentos pontuais, resultando em uma significativa redução dos impactos ambientais, visto que a aplicação de insumos é precisa e adequada (MULLA, 2013). Para as análises pontuais ou por zonas, os dados devem ser integrados com o Sistema Global de Navegação por Satélites (GNSS). O GNSS atribui à determinada característica do campo sua respectiva localização. No entanto, o receptor GNSS usualmente inserido na maioria dos VANTs comercializados, para orientação de navegação e posicionamento de imagem, não possui boa precisão para o georreferenciamento das imagens (FREELAND et al., 2019).

O georreferenciamento das imagens é dependente da aquisição de pontos de controle dentro da região imageada. Os pontos devem conter boa precisão posicional e serem visíveis na imagem. Porém, a aquisição dos pontos de controle pode inviabilizar ou dificultar a execução de determinados projetos fotogramétricos envolvendo VANTs. Além disso, áreas inacessíveis, declives acentuados e regiões com risco de deslizamento de terra podem apresentar riscos à equipe de campo durante o rastreamento dos pontos de controle (TOMAŠTÍK et al., 2019).

A necessidade de pontos de controle para o georreferenciamento das imagens inibe as vantagens da utilização de VANT como ferramenta de mapeamento. O esforço para eliminar

essa dependência pode ser observado em recentes estudos em que são adotadas correções diferenciais de GNSS para VANTs (TOMAŠTÍK et al., 2019). No entanto, a precisão de receptores GNSS de frequência única, contidos nos VANTs para operações autônomas, apresentam baixa precisão. Atualmente, o uso dos sistemas de posicionamento com correção em tempo real (Real Time Kinematic – RTK), presente em receptores de frequência L1/L2, são adicionados nos VANTs como medida de solução precisa para as dificuldades da aquisição de pontos de controle (RABAH et al., 2018).

Uma das formas de correção do posicionamento em tempo real requer dois receptores com função de comunicação por *link* de rádio, um atuando como base em coordenadas conhecidas e outro instalado no VANT (GARRIDO-CARRETERO et al., 2019). O desafio é a aplicação do método de correção RTK utilizando receptores de baixo custo com antenas de simples frequência.

O mercado, devido ao avanço da tecnologia de posicionamento, oferece modelos de receptores e antenas de variados preços e fins de utilização. Alguns receptores de baixo custo com a aplicação de antenas de frequência L1 proporcionam precisão similar aos geodésicos (TAKASU; YASUDA, 2009). Ainda, os receptores RTK de frequência L1 de baixo custo podem obter resolução competitiva de ambiguidade e desempenho de posicionamento para os receptores de frequência dupla de alto custo (GARRIDO-CARRETERO et al., 2019).

Empresas fabricantes de VANTs comercializam o produto com GNSS/RTK já inclusos com alto custo de aquisição. Outros fabricantes ofertam os módulos dos receptores de forma avulsa com menor custo. Diante do exposto, objetivou-se avaliar o desempenho e a precisão do georreferenciamento de imagens utilizando um sistema GNSS/RTK de baixo custo em diferentes alturas de voo e números de pontos de controle.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Área de Estudo e dados de referência

A área utilizada para o experimento possui 0,22 ha e 681 metros de perímetro e está localizada no campo experimental Diogo Alves de Melo da Universidade Federal de Viçosa, latitude 20°46'4,39" e longitude 42°52'11,39" (Figura 1), no município de Viçosa no estado de Minas Gerais. O terreno é plano com elevação de 640 m acima do nível do mar. Em algumas partes do terreno havia a presença de culturas de pequeno porte ou rasteiras.



Figura 1: Área experimental - Campo experimental Diego Melo - UFV. Fonte: Inglith de Souza Lage Alves (a autora)

Na área foram distribuídas 24 estacas com o intuito de serem utilizadas como pontos de controle e pontos de validação da precisão do sistema. O método escolhido para a coleta dos pontos de controle e validação foi o GNSS RTK com intervalo de 20 segundos no período de observação. Os pontos foram coletados por dois equipamentos por igual método de aquisição. No primeiro momento todos os pontos foram rastreados com o receptor geodésico GNSS L1/L2 Topmap TPS T10. Posteriormente, as 24 estacas foram rastreadas pelo sistema GNSS RTK de baixo custo.

Uma conexão de rádio em tempo real de uma base GNSS é necessária para o modo RTK. Em campo, foi alocado um ponto base. Neste ponto foram coletados dados por duas horas consecutivas com o receptor GNSS L1/L2 Topmap TPS T10. A taxa de coleta dos dados foi de 5 Hz, com máscara de elevação de 10° . O processamento dos dados da base foi feito pelo método de pós-processado, utilizando a base do IBGE presente dentro do Campus da Universidade Federal de Viçosa. O ponto base serviu de referência para o levantamento das coordenadas dos pontos de controle e validação.

Os pontos de controle foram usados apenas para o georreferenciamento das imagens enquanto os pontos de validação foram utilizados para o cálculo da precisão. Os pontos em

campo foram marcados por uma folha A4 destacada por fitas adesivas em formato de cruz. O formato do destaque auxiliou na identificação do centro do ponto no momento do processamento.

3.2.2 Aquisição e processamento de dados fotogramétricos

Para a avaliação do desempenho do sistema GNSS-RTK em modo cinemático, o equipamento foi embarcado a um VANT, modelo Matrice 100 com asas rotativas quadricóptero elétrico. O VANT possui 40 minutos de autonomia de voo e seus motores possuem baixa rotação, garantindo maior torque e estabilidade. O VANT possui estabilizadores de voo para controle de sua posição, tudo por meio do GNSS. O sistema de posicionamento integrado faz aquisição de informações de dois sistemas, GPS e GLONASS.

O VANT foi adaptado com uma câmera multiespectral do modelo RedEdge-MX fabricada por MicaSense. A câmera RedEdge-MX possui cinco sensores que possuem a capacidade de coletar dados nos seguintes comprimentos de ondas: azul, verde, vermelho, RedEdge e infravermelho. Cada um dos cinco sensores registrou imagens independentes. O sistema GNSS-RTK utilizado é composto por uma placa microcontroladora Intel Edison e antena GNSS, que realiza a aquisição das coordenadas do ponto. Também possui um modem de rádio RFD 900+ e uma antena de comunicação rádio, que possuem a função de comunicação com a estação base para correção do posicionamento.

O sistema GNSS-RTK foi acoplado ao VANT por meio de adaptações simples que garantiram estabilidade ao receptor durante o voo. Além do módulo, duas antenas foram embarcadas, uma de comunicação de rádio e outra para obtenção do sinal GNSS. Para a alimentação de energia, uma bateria externa foi colocada na parte central do veículo aéreo com o objetivo de manter a aerodinâmica inalterada.

Os voos foram planejados no aplicativo DroneDeploy. Três planejamentos foram feitos para a mesma área variando a altura de voo. Foram testados os desempenhos do equipamento de baixo custo para 40, 60 e 80 metros de altura. As sobreposições de imagem foram de 80% lateral e 70% longitudinal. A quantidade de fotos obtidas em cada voo foi diferente, sendo o número de fotos inversamente proporcional à altura.

Os dois receptores GNSS presentes no VANT trabalharam simultaneamente. O receptor de simples frequência já embarcado pelo fabricante registra a coordenada e salva como valor de pixel central. Uma imagem coletada em aerolevantamentos possui uma série de metadados.

Dentre esses, o valor de coordenada. A coordenada determina a posição da aeronave no momento da tomada da foto.

As imagens foram processadas no software pix4Dmapper. O Pix4Dmapper é um *software* cuja principal função é gerar modelos e mapas 2D e 3D georreferenciados. O *software* estima as coordenadas das imagens originais por meio da Triangulação Aérea (AAT) e Ajustamento de feixes em Bloco (Bundle Block Adjustment, BBA). Posterior a esses cálculos é possível a criação Modelos Digitais de Superfícies (MDS). O ortomosaico, por sua vez, é formado a partir da projeção e combinação das imagens originais com o MDS (PIX4D 2013).

O *software* Pix4D orienta as imagens e possibilita a alteração dos metadados. Durante o voo, enquanto o GNSS do VANT salvava os dados de coordenada no pixel central, o receptor GNSS-RTK de baixo custo alimentava um arquivo interno. A orientação do georreferenciamento convencional foi realizada com as informações do receptor do VANT. Já o georreferenciamento do sistema GNSS-RTK foi realizado alterando as coordenadas do pixel central de acordo com o horário da coleta dos dados. Além do Pix4D, foi usado o software QGIS para auxílio na manipulação de dados e também na construção dos mapas.

A avaliação do georreferenciamento utilizando o sistema GNSS-RTK foi feita de três maneiras. A primeira análise consistiu em avaliar a precisão sem a utilização de pontos de controle e compará-la com a precisão do sistema original. Na segunda avaliação, foi realizado o processamento das imagens e, antes da criação do ortomosaico, foram adicionados 3 pontos de controle. Os dados dos pixels foram interpolados e calculada a precisão por meio da comparação das coordenadas dos pontos de validação. A terceira avaliação foi similar à segunda, porém, nesta foram inseridos 5 pontos de controle.

3.2.3 Avaliação da Qualidade das Imagens

A qualidade das imagens foi avaliada por meio da comparação das coordenadas de cada pixel dos pontos alocados. Foi comparada a coordenada calculada após a interpolação dos dados na imagem com a coletada pelos receptores. Cada pixel da imagem possui coordenadas (X_{PC}, Y_{PC}) calculadas por meio da interpolação dos pontos de controle, e as 24 estacas possuíam coordenadas (X, Y) definidas pela coleta em campo com os receptores GNSS-RTK. Com estas observações foi possível a estimativa do erro médio quadrático (RMSE). O erro foi calculado para cada componente (Equações 1 e 2).

$$RMSE_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{PC} - X)^2}{n}} \quad (1)$$

$$RMSE_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{PC} - Y)^2}{n}} \quad (2)$$

em que,

$RMSE_X$ e $RMSE_Y$ - valor da raiz quadrada média no eixo X e Y, respectivamente;

X e Y – coordenadas do pixel central da imagem;

X_{PC} e Y_{PC} - valores das coordenadas coletadas pelo sistema GNSS-RTK;

n - número de pixels da imagem.

A estimativa do erro por meio das equações (1) e (2) proporcionaram a avaliação do erro em três dimensões. Para estimar o erro planimétrico foi utilizada a Equação (3).

$$RMSE_{XY} = \sqrt{RMSE_X^2 + RMSE_Y^2} \quad (3)$$

em que,

$RMSE_{XY}$ – valor da raiz quadrada da planimetria do sistema.

O $RMSE_{xy}$ é um dos critérios de precisão planimétrica mais utilizados para nuvens de pontos e foi usado como a principal medida para comparar dados do georreferenciamento pelos dois métodos aqui citados (TOMAŠTÍK et al., 2019). Esta avaliação foi feita para cada altura de voo (40, 60 e 80 metros) a fim de validar em qual altura o sistema obteve melhor desempenho em termos de precisão.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente trabalho teve a finalidade de comparar a precisão no georreferenciamento de imagens realizadas com o sistema GNSS-RTK Emlid Reach e avaliar o desempenho do equipamento em diferentes alturas de voo. Todo o procedimento do campo foi vinculado as coordenadas de base (N: 7702102.762 , E: 721757,564). Esse valor foi obtido com o pós processamento e correção com conjunto de dados. As coordenadas são apresentadas na projeção UTM (Universal Transversa de Mercator) e estão na unidade métrica de medida. O desvio padrão do processamento dos dados da base foi de (N: 0,002 m, E: 0,002 m). Este valor de desvio padrão representa a dispersão das coordenadas calculadas após a correção, ou seja, a precisão encontrada com o pós processamento dos dados rastreados.

Na Figura 2 são apresentadas as 24 estacas distribuídas de forma regular no campo, onde foi realizado o experimento. Na figura são apresentado os arranjos de 5 e 3 pontos de controle. Das 24 estacas, cinco e posteriormente 3 foram consideradas pontos de controle e o restante pontos de validação. A posição escolhida para os pontos de controle representa a melhor combinação para uma boa distribuição espacial dos pontos no terreno.



Figura 2: Distribuição de pontos de validação (em branco) na área de estudo e de pontos de controle (em vermelho). Fonte: Google Earth Pro, 2020.

Os procedimentos de pré-processamento e alteração dos valores de pixel central foram realizados e, após essa etapa, 98% das imagens foram aproveitadas. Algumas imagens do início do voo, anterior a decolagem, foram descartadas. A aeronave no início de cada voo testa a câmera para verificação do sensor. A junção das imagens resultaram em nuvens densas de pontos (Figura 3).

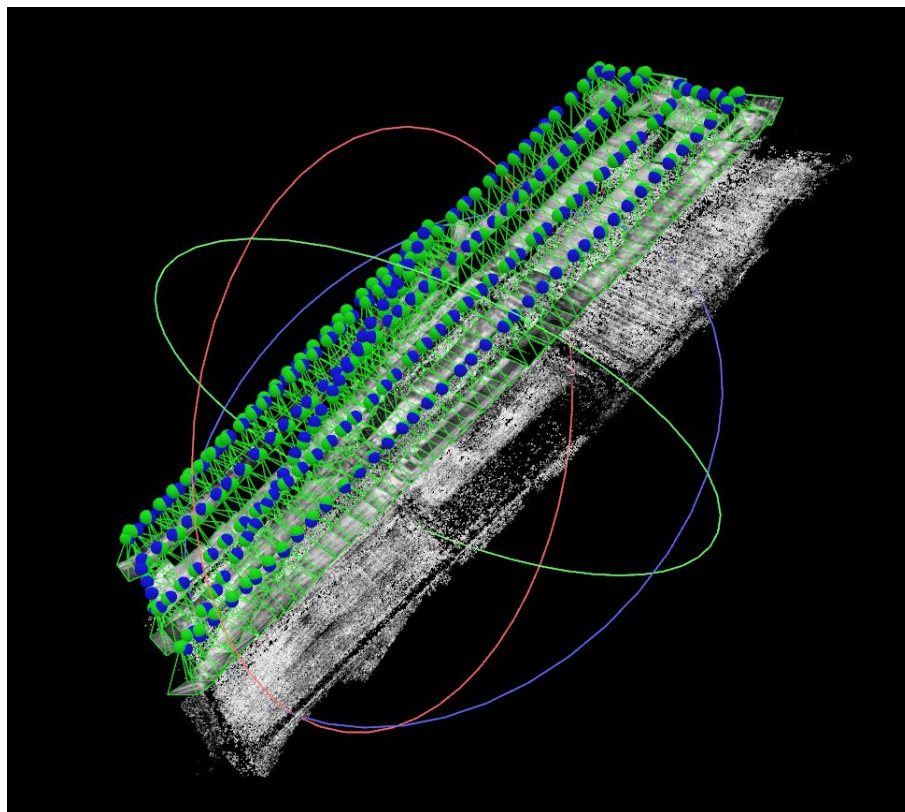


Figura 3: Imagem capturada do software Pix4D. Nuvem de pontos da área experimental. Exemplificação do voo de 40 metros. Fonte: Inglith de Souza Lage Alves (a autora).

Todos os modelos foram gerados utilizando a banda RedEdge das imagens coletadas, pois, esta banda teve maior realce dos pontos de controle no solo. Esse realce facilitou o reconhecimento dos pontos de controle nas imagens e a precisão no momento da marcação (Figura 4).

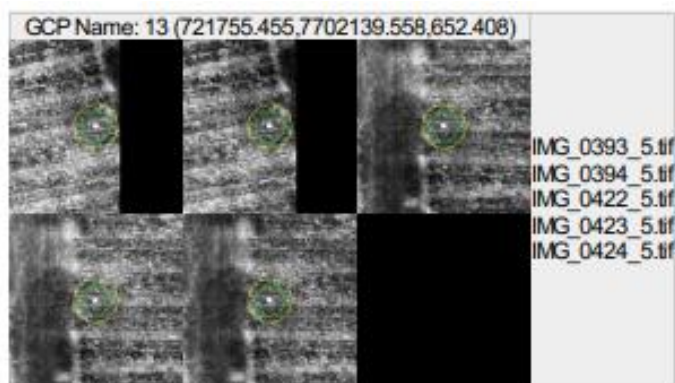


Figura 4: Imagem capturada do software Pix4D. Ponto de controle no georreferenciamento em destaque. Fonte: Inglith de Souza Lage Alves (a autora).

Cada processamento resultou em uma ortoimagem, assim como um Modelo Digital de Superfície (MDS). No MDS (Figura 5) é possível verificar que a topografia do terreno é plana. Os pontos identificados com maior altitude representam as edificações que rodeiam a área de estudo.

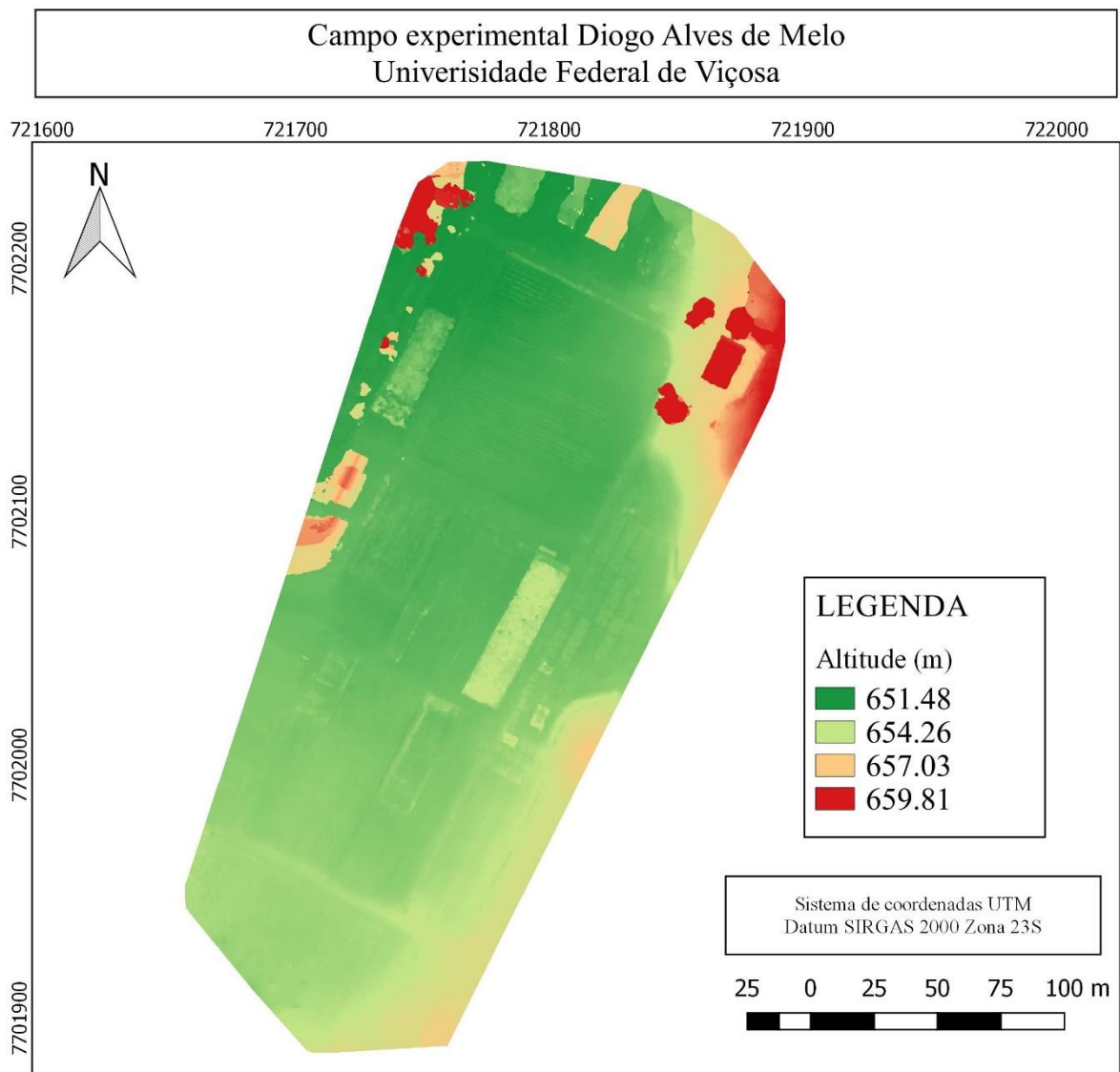


Figura 5: MDS da área de estudo. Fonte: Imagem capturada do software Pix4D.

A partir do MDS as ortoimagens foram construídas. As ortoimagens foram construídos com a banda RedEdge capturada câmera MicaSense. O mapa da área experimental apresentado na Figura 6 exemplifica a distribuição da resposta espectral para a banda RedEdge. A

distribuição para o voo de 80 metros foi demonstrada em uma escala de 0 a 255.

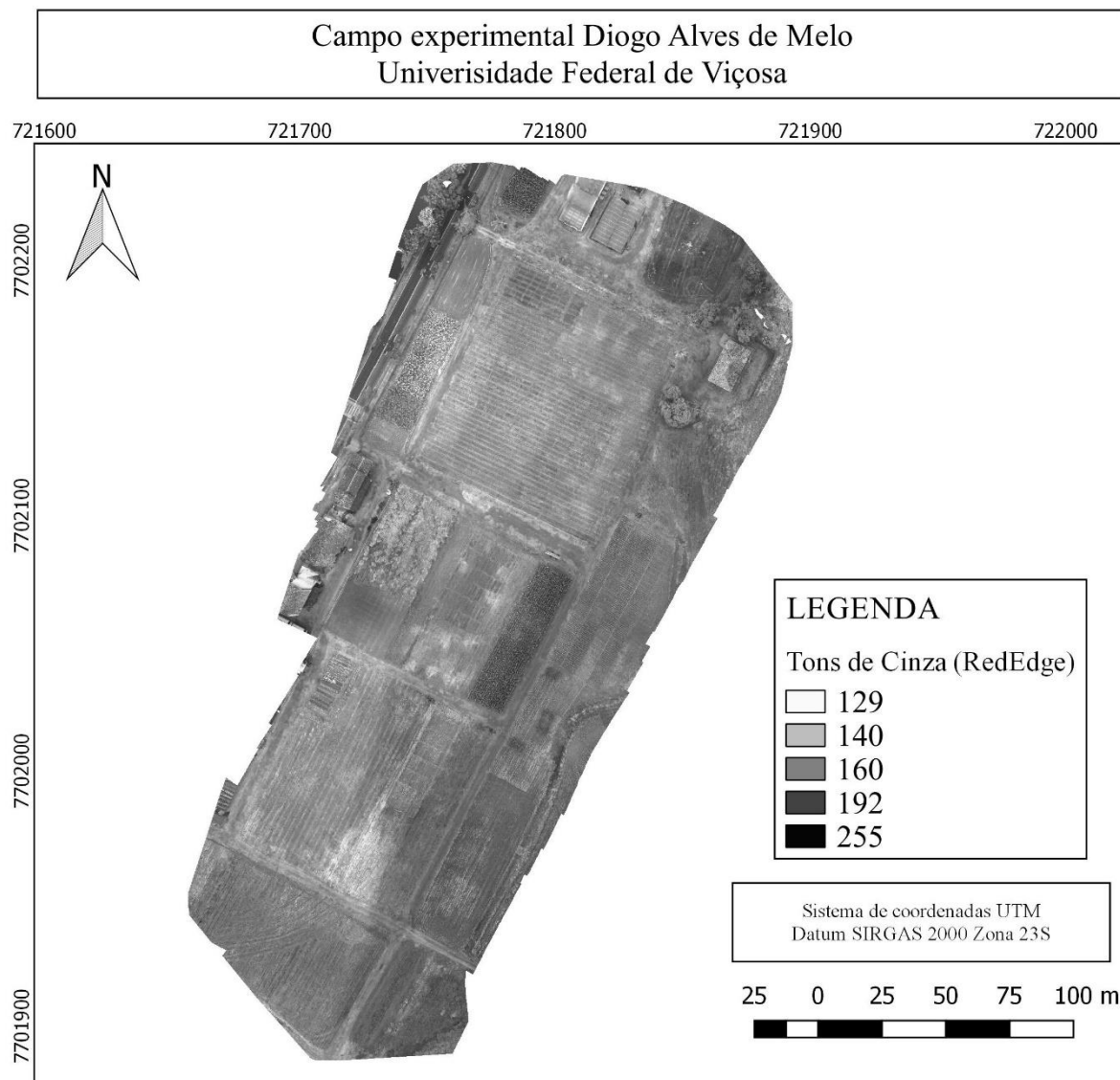


Figura 6: Ortoimagem da área experimental e comportamento espectral RedEdge. Fonte: Imagem capturada do software Pix4D.

O PIX4D, assim como a maioria dos softwares de processamento de imagens, determina uma precisão após o alinhamento das imagens mesmo sem ter sido realizada a etapa da amostragem de pontos de controle. A Tabela 1 apresenta o resultado do georreferenciamento sem pontos de controle para as distintas alturas de voo usando o GNSS-RTK e para os dados do GNSS presente no VANT.

Tabela 1. Resultado do cálculo da variação das coordenadas UTM do georreferenciamento sem pontos de controle de cada voo

	$RMSE_{GNSS}$ (m)	$RMSE_{RTK}$ (m)
40 m RTK	0,709	0,518
60 m RTK	0,743	0,551
80 m RTK	0,792	0,608

GNSS – dados do receptor de simples frequência do fabricante do VANT; RTK – dados do receptor de baixo custo testado.

Devido à diferença do número de pontos de controle das análises, somente o primeiro resultado foi realizado de forma automática pelo software, pois, observou-se durante as tentativas dos demais processamentos, uma instabilidade dos resultados gerados de forma automática. Como apresentado na metodologia, os erros quadráticos médios horizontais foram calculados com base em erros de posições individuais de cada ponto de validação.

A precisão obtida pelo software pode ser considerada um primeiro parâmetro de precisão. Porém, a tendência é uma melhora nos resultados quando se utiliza pontos de controle. A confiabilidade da coleta dos pontos de controle faz com que a precisão do georreferenciamento melhore. As Tabelas 2 e 3 apresentam resultados de precisão com o georreferenciamento utilizando 3 e 5 pontos de controle, respectivamente.

Tabela 2. Resultado do cálculo da variação das coordenadas UTM do georreferenciamento com 3 pontos de controle.

Altura de voo	$RMSE_{GNSS}$ (m)	$RMSE_{RTK}$ (m)
40m	0,037	0,076
60m	0,034	0,081
80m	0,036	0,083

RTK – dados do receptor de baixo custo testado.

Verifica-se uma melhora centimétrica da precisão com o aumento do número de pontos de controle. Em um voo de 40 metros a precisão chega a 7,6 centímetros. Nas alturas de 60 e 80 metros são encontradas precisões semelhantes, 8,1 e 8,3 cm, respectivamente. Já com o georreferenciamento utilizando 5 pontos de controle, o sistema GNSS RTK alcançou a precisão

de 5 centímetros a 40 m de altura. Quando os dados foram georreferenciados pelos dados do receptor Topmap no voo de 40 metros a precisão chega a 3,7 centímetros. Nas alturas de 60 e 80 metros são encontradas precisões semelhantes, 3,4 e 3,6 cm, respectivamente

Tabela 3. Resultado do cálculo da variação das coordenadas UTM do georreferenciamento com 5 pontos de controle.

Altura de voo	$RMSE_{GNSS}$ (m)	$RMSE_{RTK}$ (m)
40m	0,027	0,055
60m	0,035	0,065
80m	0,033	0,062

RTK – dados do receptor de baixo custo testado.

Neste estudo, observou-se a importância dos pontos de controle no georreferenciamento de dados suborbitais. Os resultados apontam uma precisão de 0,076 a 0,083 m para o uso de 3 pontos de controle e 0,055 a 0,062 com a utilização de 5 pontos. Os voos foram realizados em pequenas altitudes e os melhores resultados foram obtidos quando a aeronave estava mais próxima ao solo. Quando os dados foram georreferenciados pelos dados do receptor Topmap com 5 pontos de controle, no voo de 40 metros a precisão chega a 2,7 centímetros. Nas alturas de 60 e 80 metros são encontradas precisões semelhantes, 3,5 e 3,3 cm, respectivamente.

Os resultados mostraram uma tendência da melhora da precisão com o aumento do número de pontos de controle e a proximidade da aeronave ao solo. Porém, algumas avaliações divergem essa tendência. Aguera-Vega et al. (2017) obteve sua melhor precisão no processamento que usou 15 pontos, enquanto avaliou o uso de 4 a 20 pontos. Essa divergência pode ocorrer devido à precisão do georreferenciamento estar diretamente ligada com a execução do trabalho em campo, qualidade das imagens, boa precisão dos dados posicionais, além de uma boa operação do *software* de processamento.

A área em que o estudo foi conduzido era relativamente pequena se comparada com as áreas utilizadas por outros autores. Tahar (2013) realizou um levantamento em uma região de 150 hectares e obteve precisão de 50 centímetros usando 4 pontos de controle, precisão próxima à melhor condição encontrada nesta avaliação. Este fato mostra o quão relativo é o processo de georreferenciamento.

Os dados dos pontos de controle e de validação respeitaram em sua maioria a melhor condição de coleta com um receptor RTK. Segundo Garrido-Carretero et al. (2019) os

receptores RTK de frequência L1 de baixo custo podem obter resolução competitiva de ambiguidade e desempenho de posicionamento para os receptores de frequência dupla. Porém, apenas 87% dos dados de pontos de controle alcançaram a resolução da ambiguidade como *fix*. O restante das coordenadas que não tiveram a correção ideal influenciaram no momento da validação do georreferenciamento devido a maior variação da coordenada real.

No momento do georreferenciamento, as coordenadas dos pixels indicados como controle são interpolados. Para o processo de interpolação, a distribuição espacial regular auxilia a precisão dos valores atribuídos aos novos pixels. A área aqui estudada, por ser pequena, a distribuição regular foi possível. Porém, mesmo com o uso de pontos de controle, o método RTK de baixo custo obteve precisão inferior aos casos em que não se utilizam referências. Benassi et al. (2017) encontraram uma precisão de 0,022 m em uma área de 20 hectares.

Mesmo com a eficiência do sistema GNSS-RTK com uso de pontos de controle evidenciados neste artigo, deve-se ressaltar que existe a imprecisão dos dados estáticos coletados, ou seja, as coordenadas dos pontos em solo possuem erros posicionais. Estes erros foram avaliados no primeiro artigo deste trabalho.

O sistema avaliado mostrou menor eficiência se comparado aos receptores de alto custo usado em outros estudos. Porém, o receptor GNSS-RTK avaliado demonstrou bom desempenho quando submetido aos voos. O método de correção não influenciou no funcionamento dos controles, visto que ambos possuem a comunicação via rádio. Esses fatos validam o uso do equipamento embarcado.

A diferença dos valores da precisão do georreferenciamento sem ponto de controle entre os dois receptores utilizados neste trabalho foram próximas. Os receptores de baixo custo em movimento constante tendem a ter maior taxa de perda de sinal devido a interferências no trajeto (FREELAND et al, 2019). A perda de sinal influenciou nos dados no instante em que se apresentaram como *float*. Esse fato pode justificar o valor próximo dos dados de georreferenciamento sem pontos de controle, pois, esperava-se maior eficiência para o método de correção.

Para aumentar a eficiência do sistema para o georreferenciamento pode ser inserido ao método de processamento um pós-processamento dos dados do sistema RTK com a finalidade de atribuir maior precisão as coordenadas do solo. O método PPK pode agregar precisão milimétrica ao sistema utilizado (TOMAŠTÍK et al., 2019).

3.4 CONCLUSÃO

O sistema GNSS-RTK de baixo custo obteve bom desempenho quando submetido ao modo cinemático acoplado a um VANT. O uso do sistema com a adição de pontos de controle para o georreferenciamento obteve precisão centimétrica em todas as alturas de voo avaliadas. Porém quando os mosaicos são georreferenciados com os dados do receptor Topmap os resultados do RMSE são mais precisos.

Com os resultados, pode-se concluir que, para este experimento, quando maior a proximidade da aeronave ao solo melhor o reconhecimento dos pontos de controle e, por consequência, melhoras foram observadas na precisão do posicionamento.

O uso de pontos de controle foi indispensável para a melhora do georreferenciamento. A precisão do uso do sistema sem pontos de controle esteve na ordem de 60 cm para o sistema de baixo custo, muito acima da precisão de 5 cm obtida para o mesmo sistema quando usados pontos de controle.

3.5 REFERÊNCIAS

- BORGOGNO MONDINO, E.; GAJETTI, M. Preliminary considerations about costs and potential market of remote sensing from UAV in the Italian viticulture context. *European Journal of Remote Sensing*, v. 50, n. 1, p. 310–319, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1080/22797254.2017.1328269>>.
- DABOVE, Paolo; MANZINO, Ambrogio M. Artificial neural network for detecting incorrectly fixed phase ambiguities for L1 mass-market receivers. *GPS Solutions*, v. 21, n. 3, p. 1213–1219, 2017.
- FREELAND, Robert *et al.* Agricultural drainage tile surveying using an unmanned aircraft vehicle paired with Real-Time Kinematic positioning—A case study. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 165, n. September 2018, p. 104946, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104946>>.
- GARRIDO-CARRETERO, María S. *et al.* Low-cost GNSS receiver in RTK positioning under the standard ISO-17123-8: A feasible option in geomatics. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 137, p. 168–178, 2019.
- HE, Xiaoxing *et al.* Review of current GPS methodologies for producing accurate time series and their error sources. *Journal of Geodynamics*, v. 106, p. 12–29, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2017.01.004>>.
- KARPIK, A. P.; LIPATNIKOV, L. A. Combined application of high precision positioning methods using GLONASS and GPS signals. *Gyroscope and Navigation*, v. 6, n. 2, p. 109–114, 2015.
- KESKIN, Muharrem; SAY, Sait M.; GÖRÜCÜ KESKIN, Serap. Evaluation of a low-cost GPS receiver for precision agriculture use in adana province of Turkey. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, v. 33, n. 1, p. 79–88, 2009.
- KESKIN, Muharrem; SEKERLI, Yunus Emre; KAHRAMAN, Suleyman. Performance of two low-cost GPS receivers for ground speed measurement under varying speed conditions. *Precision Agriculture*, v. 18, n. 2, p. 264–277, 2017.
- LI, Tuan *et al.* High-accuracy positioning in urban environments using single-frequency multi-GNSS RTK/MEMSIMU integration. *Remote Sensing*, v. 10, n. 2, 2018.
- MAES, Wouter H.; STEPPE, Kathy. Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. *Trends in Plant Science*, v. 24, n. 2, p. 152–164, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2018.11.007>>.
- MULLA, David J. Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, v. 114, n. 4, p. 358–371, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009>>.
- PIX4D. Pix4d Training. Apresentação PPT. 2013a. Disponível em: <https://s3.amazonaws.com/uav.pix4d.com/examples/training/Pix4D+training.pdf>

RABAH, M. *et al.* Using RTK and VRS in direct geo-referencing of the UAV imagery. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, v. 7, n. 2, p. 220–226, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2018.05.003>>.

TAKASU, Tomoji; EBINUMA, Takuji; YASUDA, Akio. Effect of Quasi Zenith Satellite (QZS) on GPS Positioning 2 . Simulation and Evaluation. p. 2–6, 2009.

TAKASU, Tomoji; YASUDA, Akio. Development of the low-cost RTK-GPS receiver with an open source program package RTKLIB. *International Symposium on GPS/GNSS*, n. January 2009, p. 4–6, 2009.

TOMAŠTÍK, Julián *et al.* UAV RTK/PPK method—An optimal solution for mapping inaccessible forested areas? *Remote Sensing*, v. 11, n. 6, 2019a.

TOMAŠTÍK, Julián *et al.* UAV RTK/PPK Method—An Optimal Solution for Mapping Inaccessible Forested Areas? *Remote Sensing*, v. 11, n. 6, p. 721, 2019b.

4 CONCLUSÃO GERAL

De modo geral, pelos resultados obtidos neste trabalho, pôde-se concluir que:

Receptores GNSS com capacidade de correção em tempo real e comunicação por link de rádio podem ser colocados a bordo de aeronaves remotamente pilotadas sem interferências ou quaisquer perdas de sinais de outros sensores. O sistema obteve, na avaliação do georreferenciamento e dos dados estáticos, precisão centimétrica comprovando a eficiência dos receptores. No entanto, quando o sistema foi submetido à avaliação cinemática, em que foram avaliados os dados de orientação da aeronave, os erros obtidos foram métricos.

Os dados de precisão do georreferenciamento sem pontos de controle do sistema de baixo custo são melhores se comparados com o sistema original. O sistema GNSS-RTK avaliado neste estudo apresenta grande potencial para substituir o receptor GNSS de simples frequência presente na aeronave. Entretanto, a fonte de alimentação de energia deve ser repensada para que não influencie no tempo estimado de durabilidade das baterias da aeronave.

Dentre as análises feitas, o georreferenciamento com 5 pontos de controle no voo de 40 metros foi o que melhor obteve precisão dos dados posicionais, sendo esta de 5,5 cm. Este resultado foi obtido a partir das condições no momento da coleta dos dados.