



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Campus de Botucatu



BRUNO TIMÓTEO RODRIGUES

**TOPOGRAFIA NA VALIDAÇÃO DE MODELO DE TERRENO OBTIDO POR MEIO
DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA - RPA**

Botucatu

2020

BRUNO TIMÓTEO RODRIGUES

**TOPOGRAFIA NA VALIDAÇÃO DE MODELO DE TERRENO OBTIDO POR MEIO
DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA - RPA**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia. (Energia na Agricultura).

Orientador: Prof. Dr. Sergio Campos

Botucatu

2020

R696t

Rodrigues, Bruno Timóteo

Topografia na validação de modelo de terreno obtido por meio de Aeronave Remotamente Pilotada - RPA / Bruno Timóteo Rodrigues. – Botucatu, 2020

91 p. : tabs., fotos, mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu

Orientador: Sérgio Campos

1. Sensoriamento remoto. 2. Fotogrametria aérea. 3. Topografia. 4. Levantamentos topográficos. 5. Sistemas de informação geográfica. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: TOPOGRAFIA NA VALIDAÇÃO DE MODELO DE TERRENO OBTIDO POR MEIO DE AERONAVE REMOTAMENTE PILOTADA - RPA

AUTOR: BRUNO TIMOTEO RODRIGUES

ORIENTADOR: SÉRGIO CAMPOS


Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:




Prof. Dr. SÉRGIO CAMPOS
Engenharia Rural e Socioeconomia / Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu - UNESP

p/ Prof. Dr. LUCIANO NARDINI GOMES 
Geociências / Universidade Estadual de Londrina

p/ Prof.ª Dr.ª FERNANDA LEITE RIBEIRO 
Geociências / Universidade Estadual de Londrina

p/ Dr.ª YARA MANFRIN GARCIA 
Bauru/SP / .

p/ Prof. Dr. OSMAR DELMANTO JUNIOR 
Agronegócio / Faculdade de Tecnologia de Botucatu

Botucatu, 27 de julho de 2020

Aos meus queridos Pais, Evania e Jonas,

E ao meu querido irmão Mikael,

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus, por todas as graças concedidas, pela luz nos momentos difíceis, pela saúde e disposição que me cobriu em todos os momentos de minha vida, me tornando um homem de fé.

À Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA – UNESP), campus de Botucatu, e à Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Energia na Agricultura, pela oportunidade.

À Universidade espanhola de Castilla-La Mancha, na pessoa do Professor Manuel Esteban, pela orientação e ensinamentos durante todo meu período de estágio de doutoramento no exterior.

Ao Professor Dr. Sérgio Campos, que depositou confiança em meu trabalho, conhecimento e em minha pessoa, me auxiliando na condição de orientador. Sobretudo obrigado por sua amizade.

Ao CNPQ – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro, concedido por meio de bolsa de estudos de doutorado (Nº do Processo: 142067/2016-4)

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos concedida para estágio de doutoramento na Espanha pelo Programa de Doutorado Sanduiche no exterior-PDSE (Nº do Processo: 88881.190461/2018-01).

Ao meu irmão Dr. Mikael Timóteo Rodrigues, pelas valiosas orientações, pela parceria consolidada nas atividades acadêmicas junto ao grupo de pesquisa GEPEGEO e sobretudo pela enorme amizade e companheirismo diários, não só academicamente e profissionalmente, como no dia a dia social e familiar, onde aprendi muito durante estes anos de trabalho e convivência.

A todo o corpo docente do Departamento de Engenharia Rural no qual tive o enorme prazer em conviver ao longo desses anos de pós-graduação em mestrado e doutorado, pela acolhida e principalmente pela amizade, fazendo da ciência e da extensão uma forma de minimizar as distâncias entre o conhecimento científico e a sociedade.

À todos os funcionários do Departamento de Engenharia Rural, bem como aos colegas e amigos coniventes de muitas prosas, Dorival Aparecido, Maury Torres da Silva, o parceiro Biral que sempre me ajudaram de alguma forma, seja com um assunto específico ou uma palavra de amiga.

Aos funcionários da Seção de Pós-Graduação, especialmente a Débora, e aos competentes funcionários da biblioteca, por estarem sempre dispostos a sanar e ajudar nossas solicitações e problemas.

Aos amigos e companheiros que fiz nesses anos de Pós-Graduação, fazendo disciplinas, trabalhando junto ao grupo de pesquisa, morando juntos, fazendo churrascos, bem como outros momentos de confraternização e descontração. Dentre estes estão: Vitor Oliveira Maia (Vitão), Vitor Araújo (Vitinho), Fernando João Bispo, Fernando Bezerra (Tocantins), Vinicius Ribeiro, Hugo Correa (Manaus), Gean Monteiro (Gaúcho), Dani Trafi, Ronaldo Pollo, Mauricio Prado, Arilson Junior, Felipe Nogueira Tagliarini, Yara Garcia, em meio tantos outros.

Aos queridos familiares, Avô, Tias, Tios, primos e primas (na qual tenho como irmãs) pela sincera e afetuosa torcida e apoio em todas as fases da minha vida, principalmente, por todo carinho e amor.

A todos, minha eterna gratidão e consideração

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi realizar um levantamento topográfico em determinadas áreas fazendo-se uso das técnicas de Topografia (Estação Total, GNSS-RTK) e Aerofotogrametria por Aeronaves Remotamente Pilotadas-RPAs (também conhecidas como Veículos Aéreos Não Tripulados-VANTs e popularmente conhecidas como Drones), para que de tal modo possa constatar na prática as similaridades e divergências destas ciências por meio de uma visão técnica e aplicada. Para a realização do levantamento topográfico foi utilizado um equipamento receptor GNSS operando em método de posicionamento RTK (*Real Time Kinematic*) para a aquisição de Pontos de Controle bem como a execução e coleta de dados de diversos pontos cotados. Na coleta de dados por aerolevanteamento são utilizadas variáveis fotogramétricas que interferem direta ou indiretamente na qualidade final do produto fotogramétrico, que são os valores topográficos representados na forma de MDT (Modelo Digital de Terreno), estes podendo ser utilizados como dado planialtimétrico. Os métodos de obtenção de dados por aerolevanteamento com imagens geradas por RPA, comparados com os métodos de topografia terrestre por GNSS, para a obtenção de volume de sedimentos, demonstraram que não há diferença estatisticamente significativa entre os dados de Volume (m^3) dos métodos (RPA e GNSS), com um nível de confiança superiores a 95,0%. Os valores estatísticos de viés e curtose padronizados não indicam desvios significativos da normalidade, validando os procedimentos estatísticos nas metodologias comparadas nos capítulos aqui apresentados. Pelo método de aerolevanteamento por RPA, obteve-se uma densidade de pontos com valores topográficos significativamente superior ao método topográfico por Estação total e GNSS RTK e seus respectivos produtos em ambos os capítulos (1 e 2), validando acurácia e exatidão das técnicas empregadas.

Palavras-chave: Topografia, Aerofotogrametria com Drones, Modelo Digital de Terreno, Erro de Cotas Topográficas, Cálculos de Volume.

ABSTRACT

The objective of this work was to perform a topographic survey in certain areas using the techniques of Topography (Total Station, GNSS-RTK) and Aerophotogrammetry by Remotely Piloted Aircraft-RPAs (also known as Unmanned Aerial Vehicles-UAVs and popularly known as Drones), for that in such a way it can verify in practice the similarities and divergences of these sciences through a technical and applied vision. For the topographic survey, a GNSS receiver equipment was used, operating in RTK (Real Time Kinematic) positioning method for the acquisition of Control Points as well as the execution and data collection of several listed points. In the data collection by aerial survey, photogrammetric variables are used that directly or indirectly interfere in the final quality of the photogrammetric product, which are the topographic values represented in the form of MDT (Digital Terrain Model), which can be used as planialtimetric data. The methods of obtaining data by aerial survey with images generated by RPA, compared with the methods of terrestrial topography by GNSS, to obtain sediment volume, demonstrated that there is no statistically significant difference between the data of Volume (m^3) of the methods (RPA and GNSS), with a confidence level above 95.0%. The standardized bias and kurtosis statistical values do not indicate significant deviations from normality, validating the statistical procedures in the methodologies compared in the chapters presented here. By the method of aerial survey by RPA, it was obtained a density of points with topographic values significantly higher than the topographic method by Total Station and GNSS RTK and their respective products in both chapters (1 and 2), validating the accuracy and precision of the employed techniques.

Keywords: Topography, Aerophotogrammetry with Drones, Digital Terrain Model, Topographic Value Error, Volume Calculations.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
CAPÍTULO 1	17
DADOS TOPOGRÁFICOS ALTIMÉTRICOS POR AEROFOTOGRAMETRIA COM RPAs SOBRE INFLUÊNCIA DE DIFERENTES VARIÁVEIS DE CONFIGURAÇÕES DE VOO COMPARADOS A TOPOGRAFIA POR GNSS-RTK.....	17
1.1. Introdução	18
1.2. Material e Métodos	19
1.2.1. Área de Estudo.....	19
1.2.2. Aerolevanteamento com RPAs x Topografia por GNSS	20
1.2.2.1. Levantamento topográfico por GNSS/RTK.....	21
1.2.2.2. Levantamento topográfico por Aerofotogrametria com RPA	22
1.2.2.2.1. Planejamento de Voos Autônomos	23
1.2.2.2.2. Execução de Voos Autônomos	25
1.2.3. Análises estatísticas	28
1.3. Resultados	29
1.3.1. Topografia por GNSS/RTK.....	29
1.3.2. Topografia por Aerofotogrametria com RPA	31
1.3.3. Análise comparativa entre topogr. por GNSS e Aerofotogr. com RPA..	34
1.3.3.1. Método estatístico ANOVA para GSD	36
1.3.3.1.1. Testes de Múltiplas Classes para ‘Erro de Cotas’ por GSD	36
1.3.3.1.2. Teste de Kruskal-Wallis para ‘Erro de Cotas’ por ‘GSD’.....	37
1.3.3.2. Método estatístico ANOVA para Sobreposição.....	38
1.3.3.2.1. Testes de múltiplas classes para ‘Erro de Cotas’ por sobreposição	38
1.3.3.2.2. Teste de Kruskal-Wallis para ‘Erro de Cotas’ por Sobreposição	39
1.3.3.3. Estatística ANOVA para ‘Erro de Cotas’ por ‘Métodos’	40
1.3.3.3.1. Testes de Múltiplas Classes para ‘Erro de Cotas’ por ‘Métodos’	40
1.3.3.3.2. Teste de Kruskal-Wallis para ‘Erro de Cotas’ por ‘Métodos’.....	42
1.3.3.4. Correlação para GSD.....	43
1.3.3.5. Correlação para Sobreposição.....	44
1.3.3.6. Correlação para Método (GSD + Sobreposição).....	46
1.4. Discussão.....	48
1.4.1. GSD.....	48
1.4.2. Sobreposição.....	48

1.4.3.	Método	49
1.5.	Conclusão	50
	REFERÊNCIAS	51
	CAPÍTULO 2.....	53
	EFICIÊNCIA E PRECISÃO DE AEROFOTOGRAMÉTRIA POR RPA NO CÁLCULO DE ACÚMULO DE SEDIMENTOS EM DIQUES DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL.	53
2.1.	Introdução	54
2.2.	Material e Métodos	57
2.2.1.	Área de Estudo	57
2.2.2.	Levantamento topográfico por Aerofotogrametria com RPA.....	58
2.2.2.1.	Aquisição das imagens	61
2.2.2.2.	Georreferenciamento e Ortomosaico (etapas de produção dos dados) 62	
2.2.3.	Levantamento por Estação Total e GNSS/RTK e Est. do volume	65
2.2.4.	Analises Estatísticas	67
2.3.	Resultados	68
2.3.1	Topografia por Estação Total e GNSS/RTK.....	69
2.3.2	Topografia por Aerofotogrametria com RPA	70
2.3.3.	Análise comparativa entre topografia por Aerofotogrametria com RPA e Estação Total e GNSS/RTK.....	71
2.3.3.1.	Análise estatística ANOVA.....	73
2.3.3.1.1	Testes de Múltiplas Classes para Vol. por Métodos de levantamento... 73	
2.3.3.1.2	Teste de Kruskal-Wallis para Volume por Métodos	74
2.3.3.2.	ANOVA Multifatorial para Método e Tamanho	75
2.3.3.3.	Análise de correlação	75
2.3.3.4.	Regressão simples - 'Volume por RPA' vs.'Volume por GNSS'.....	77
2.3.3.5.	Análise de densidade e pontos	79
2.4.	Discussão	81
2.5.	Conclusão	83
	REFERÊNCIAS	84
	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	90
	REFERÊNCIAS	91

INTRODUÇÃO GERAL

Surgida na França, em meados do século XIX, a Fotogrametria evoluiu e vem passando por distintas modificações protagonizadas pelo avanço tecnológico, como a chegada dos aviões, dos computadores, das câmeras digitais e mais recentemente com a surgimento das Aeronaves Remotamente Pilotadas-RPAs (também conhecidas como Veículos Aéreos Não Tripulados-VANTs e popularmente conhecidas como Drones), que possibilitou a sua popularização devido sua praticidade de logística e baixo custo de operação.

Com essa chegada das RPAs no campo da fotogrametria a principal mudança foi referente à logística, expansão na resolução temporal (uma vez que esses equipamentos possuem versatilidade de voos) e diminuição de custo, Considerando o elevado investimento outrora necessário para contratação de serviços fotogramétricos, inviabilizando assim a execução de alguns projetos, por motivo do alto valor agregado, o que restringia o acesso apenas a grandes corporações, órgãos públicos e grandes empresas de engenharia e impossibilitando projetos de cunho acadêmico (RODRIGUES et al. 2017).

Devido a isto, a prática da fotogrametria tornou-se uma alternativa competitiva com a topografia, a ciência mais antiga das geociências. Por este fato, surgem diversas dúvidas entre os usuários, relativo à acurácia do mapeamento aéreo com relação à topografia, bem como, o emprego correto da utilização das técnicas para um determinado objetivo.

As RPAs são apontadas como a nova revolução das geotecnologias após o sistema GPS, como aponta Rodrigues et al. (2017), esta tecnologia adéqua inúmeras possibilidades, onde é apresentado no presente trabalho os meios e oportunidades que apresentam praticidade logística e financeira da aerofotogrametria por meio de RPAs.

Com o surgimento das RPAs atuando nos mais variados setores, passou a existir uma especulação que há em torno do mapeamento aéreo por meio desta tecnologia, gerando dúvidas inerentes a sua utilização no segmento das ciências agrárias. Assim, com este trabalho pretendeu-se proporcionar uma base metodológica e um banco de dados que ajude a minimizar receios no levantamento aéreo por RPAs e esclareça a potencialidade dessa geotecnologia, reduzindo tempo na aquisição de dados e

precisão confiável e homogênea, podendo ser dimensionada conforme as necessidades específicas de cada terreno, suas características e suas aplicações.

O objetivo foi realizar levantamentos topográficos em áreas com características planas e declivosas, fazendo-se uso das técnicas de Topografia e Aerofotogrametria por RPAs, para que de tal modo possa constatar na prática as similaridades e divergências destas ciências por meio de uma visão técnica e aplicada. Para tanto, foram realizados dois (2) tipos de experimento, no primeiro foi exercida uma comparação direta do modelo de terreno e o segundo consistiu na aferição e validação de cálculos de volume obtidos por Aeronave Remotamente Pilotada (RPA).

Consistiu, em suma, em mensurar o tempo utilizado na metodologia e aplicabilidade de cada ciência, qual tempo de processamento para originar os produtos finais, bem como principalmente em confrontar os dados gerados e seus diferenciais, restrições e aplicações.

CAPÍTULO 1

DADOS TOPOGRÁFICOS ALTIMÉTRICOS POR AEROFOTOGRAMETRIA COM RPA SOBRE INFLUÊNCIA DE DIFERENTES VARIÁVEIS DE CONFIGURAÇÕES DE VOO COMPARADOS A TOPOGRAFIA POR GNSS-RTK.

Autor: Bruno Timóteo Rodrigues

RESUMO

Objetivo deste capítulo foi realizar um levantamento topográfico em área com características planas e declivosas, fazendo-se uso das técnicas de Topografia por GNSS/RTK e Aerofotogrametria por Aeronave Remotamente Pilotada (RPA), para evidenciar disparidades destas ciências por meio de uma visão técnica e aplicada. O levantamento foi aplicado em uma área experimental da Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA) que compõe um dos campus da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), localizada no município de Botucatu. Para a realização do levantamento topográfico foi utilizado equipamento GNSS RTK (*Real Time Kinematic*) e para o levantamento Aerofotogramétrico foi utilizado Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) do tipo multirrotores, embarcado com sensor RGB. Foram utilizados dois (2) tipos de variáveis fotogramétricas que interferem diretamente na qualidade final do produto: o *Ground Sample Distance* – GSD e Sobreposição de Imagens. Foi observada correlação positiva entre os dados de GNSS e os dois níveis da variável GSD, com R^2 de 0,9989 para o GSD de ‘1,5’ e 0,9919 para GSD de ‘3,0’, bem como correlação positiva entre os dados de GNSS e os três (3) parâmetros da variável Sobreposição, com R^2 de 0,989, 0,998 e 0,999 para as Sobreposições de ‘70x50’, ‘70x70’ e ‘80x80’ respectivamente. As classes de GSD, com os equipamentos utilizados neste trabalho, apresentaram Erros Médios de 138,62mm para o ‘1.5cm’ e 212,81mm para ‘3.0cm’, apontando que quanto maior o GSD, maior o nível de detalhamento e conseqüente diminuição do erro no modelo topográfico. A taxa de Sobreposição ‘80x80’ demonstrou melhor desempenho que as ‘70x70’, sendo seguida pelo nível ‘70x50’, as quais apresentaram Erros Médios de 124,70mm, 162,81mm e 239,65mm respectivamente. Isso evidencia que quanto maior a taxa de sobreposição menor a probabilidade ao Erro no modelo topográfico.

Palavras-chave: Aeronave Remotamente Pilotada; *Ground Sample Distance* (GSD); Modelo Digital de Elevação; Sobreposição de Imagens.

1.1. Introdução

A Fotogrametria é uma ciência que surgiu na França em meados do século XIX, primeiramente desempenhada com balões, desde então, como apontado por Rodrigues et al. (2017), esta ciência passou por distintas modificações protagonizadas pelo avanço tecnológico, como a chegada dos aviões, dos computadores, das câmeras digitais e mais recentemente com a surgimento dos RPAs, que possibilitou a sua popularização devido sua praticidade de logística e baixo custo de operação.

Com essa chegada das RPAs no campo da fotogrametria a principal transformação foi com relação à logística, expansão na resolução temporal (uma vez que tais equipamentos possuem versatilidade de voos) e diminuição custo, tendo em vista que era necessário um elevado investimento para contratação de serviços para empresas ligadas a aerofotogrametria, assim, tornando-se inviáveis alguns projetos devido ao alto valor agregado, restringindo o acesso apenas à órgãos públicos e grandes empresas de engenharia e impossibilitando projetos de cunho acadêmico (RODRIGUES et al. 2017).

A utilização de Modelos Digitais de Superfície (MDS), bem como ortomosaicos em alta resolução especial são relevante importância para muitas áreas das Engenharias (AGÜERA-VEJA, et al., 2016). RPAs (também conhecidas por Veículos Aéreos Não Tripulado-VANTs) embarcados com sensores estão sendo usados para produzir esses produtos cartográficos com aplicações em projetos de topográfica, pois eles possuem características e vantagens sobre satélites, aeronaves tripuladas convencionais, especialmente pelo seu baixo custo, flexibilidade operacional (resolução temporal) e superior resolução espacial (COLOMINA: MOLINA, 2014; RODRIGUES et al., 2017).

Devido a isto, a fotogrametria tornou-se uma alternativa competitiva com a topografia, a ciência mais antiga das geociências. Por este fato, surgem diversas dúvidas entre os usuários, relativo à acurácia do mapeamento aéreo com relação à topografia, bem como, o emprego correto da utilização das técnicas para um determinado objetivo.

As RPAs surgem como ferramentas de aquisição de imagens empregadas nas pesquisas de cunho topográfico, podendo realizar levantamentos precisos e acurados

quanto a topografia terrestre (JAMES et al., 2017; TONKIN, et al., 2014) desde que seguidos os métodos corretos de planejamento de voo.

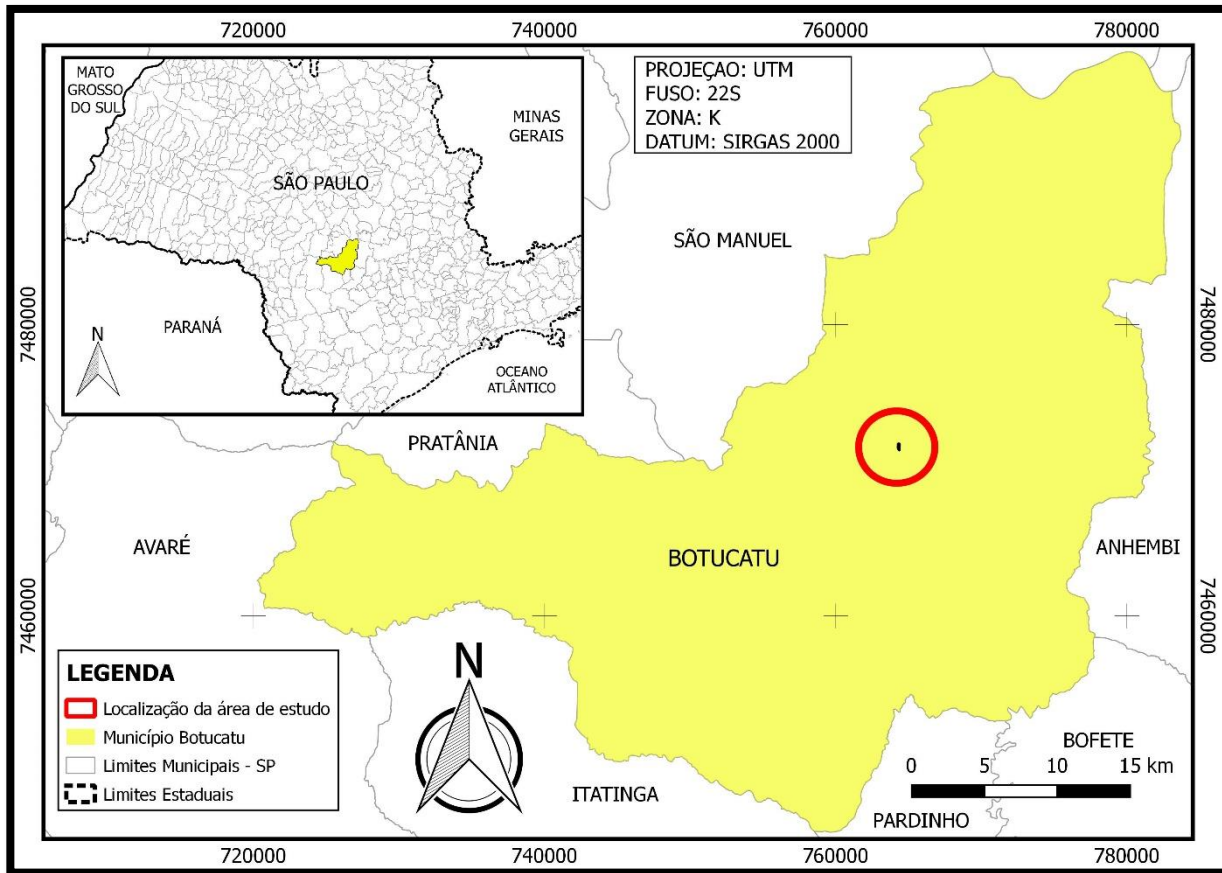
Modelos Digitais de Terreno (MDT) produzidos a partir de RPAs comparados com varredura a laser terrestre, apontam erros inferiores a um centímetro, demonstrando que o emprego do uso de RPAs para gerar MDT é uma técnica vantajosa para quantificar e qualificar mudanças na superfície do solo em escalas elevadas de campo (ELTNER, et al., 2014). Uysal et al.(2015), realizaram uma análise de precisão dos MDTs gerados por fotogrametria derivada de RPA e concluíram que é possível usar essa metodologia como produção de mapas, levantamento e algumas outras aplicações de engenharia com as vantagens das clássicas metodologias, porém, de baixo custo, mínimo tempo de campo.

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi realizar um levantamento topográfico em área com características planas e declivosas, fazendo-se uso das técnicas de Topografia por GNSS/RTK e Aerofotogrametria por RPA, para que de tal modo possa constatar na prática as similaridades e divergências destas ciências por meio de uma visão técnica e aplicada. Foi mensurado o tempo utilizado na metodologia e aplicabilidade de cada ciência, qual tempo de processamento para originar os produtos finais, bem como foram confrontados os dados gerados e seus diferenciais, restrições e aplicações.

1.2. Material e Métodos

1.2.1. Área de Estudo

O trabalho foi desenvolvido em uma área experimental da Faculdade de Ciências Agrônomicas (FCA) que compõe um dos campus da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho (UNESP), localizada no município de Botucatu, região centro-oeste do estado de São Paulo, mais especificadamente nas coordenadas UTM 764346 Leste e 7471611 Sul, Fuso 22K (coordenadas geográficas expressas em 22°50'32.89" de Latitude Sul e 48°25'26.91" de Longitude Oeste) (Figura 1).

Figura 1. Localização da área de estudo.

1.2.2. Aerolevanteamento com RPAs x Topografia por GNSS

Foram gerados Modelos Digitais de Elevação (MDEs) contendo os dados topográficos oriundos dos levantamentos aéreos com RPAs, para que estes dados sejam confrontados com os dados provenientes do levantamento topográfico por GNSS da mesma área definida.

Tendo isso em vista, sabe-se que ambos os métodos possuem seus pontos positivos e negativos e principalmente suas limitações. Com isso, o que é mais importante na execução de projetos em diversas áreas de aplicabilidade é conhecer as características de cada método de levantamento (topografia terrestre por GNSS e por meio de RPAs) e aplicar de acordo com as necessidades exigidas.

Para tanto, neste trabalho, os dados oriundos da topografia terrestre por GNSS e dos RPAs foram comparados para que se tenha uma percepção da qualidade, das

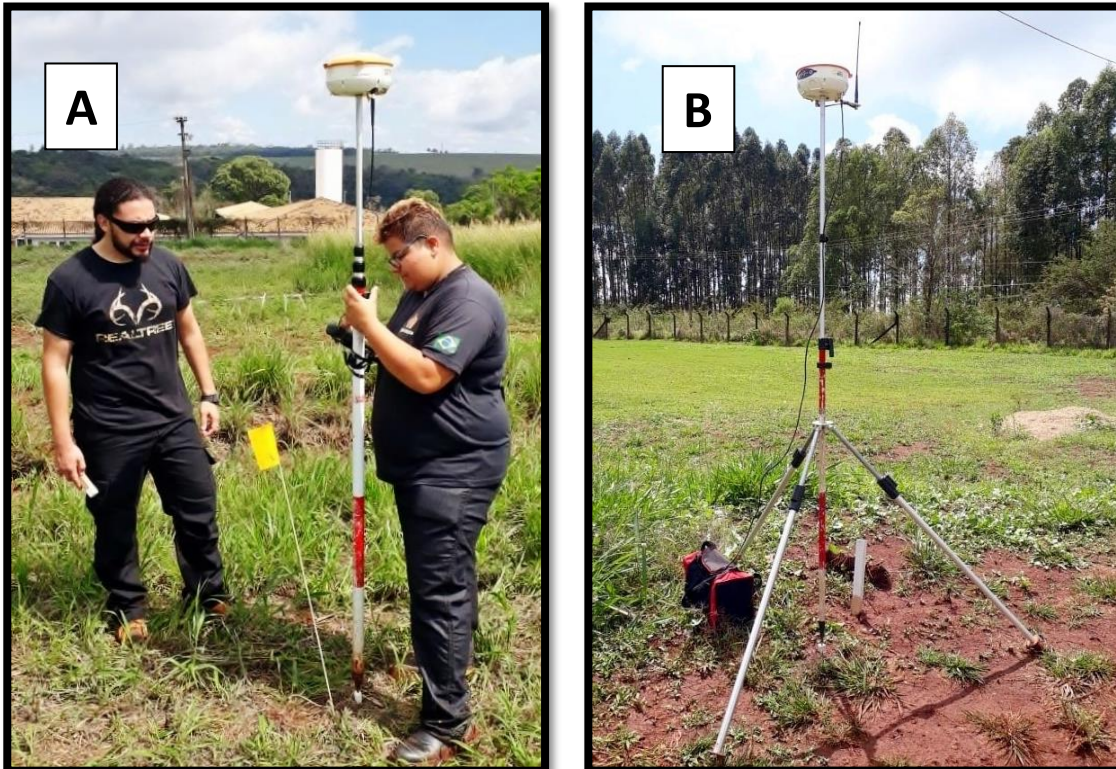
características e dos benefícios, desta forma, quantificando como a fotogrametria pode ser utilizada de forma a ser extraída os melhores resultados dentre os diferentes métodos de trabalho e formas de aplicabilidades.

1.2.2.1. Levantamento topográfico por GNSS/RTK

Para a realização deste levantamento topográfico foi utilizado um equipamento GNSS RTK (*Real Time Kinematic*) para a aquisição de Pontos de Controle bem como a execução e coleta de dados de diversos pontos cotados (Figura 2).

A etapa de levantamento dos dados topográficos por GNSS/RTK foi realizada no dia 21 de setembro de 2018. O equipamento utilizado foi um dispositivo GNSS de alta performance (TechGeo, modelo GTRi) com precisão centimétrica, após a coleta em campo os dados de pontos foram tratados com o *software* DataGeosis Office. Gerando uma rede de pontos cotados georreferenciados, constando informações geoespaciais em três (3) eixos: Latitude, Longitude e Altitude (X, Y e Z, respectivamente). Consequentemente os mesmos dados foram trabalhados por um método de interpolação TIN, convertendo os dados para outra forma de dados vetoriais e também produzem produtos cartográficos matriciais como MDT.

Figura 2. Levantamento topográfico foi utilizado um equipamento RTK. Rover (A). Base (B).



1.2.2.2. Levantamento topográfico por Aerofotogrametria com RPA

Para tanto foram utilizados dois (2) tipos de variáveis fotogramétricas que podem e/ou devem interferir direta ou indiretamente na qualidade final do produto fotogramétrico que, no caso deste trabalho, trata-se dos valores topográficos representados na forma de MDT que pode ser utilizado como dado planialtimétrico. Essas variáveis são:

- GSD (Resolução espacial da imagem do levantamento, variada pela altura da programação do plano e execução do voo);
- Sobreposição de Imagens.

Para a variável GSD (*Ground Sample Distance* / Distância de amostragem do solo), que é o termo utilizado para designar a resolução da imagem (representado pelo tamanho do Pixel) foram adotados dois tipos de segmento, dispondo os valores

de 1,5cm e 3,0cm, desta forma foram planejados e executados dois tipos de planos de voos distintos para cada GSD, de forma a obedecerem em cada plano de voo parâmetros técnicos referentes à altitude para obtenção das resoluções (GSD) propostas.

Para a variável Sobreposição de Imagens, que consiste nas configurações de Sobreposição Frontal (*Overlap*) e Sobreposição lateral (*Sidelap*) para as imagens coletadas em voo, foram adotados 3 segmentos de planejamento e execução de planos de voos para captura de dados fotogramétricos, esses segmentos se conformaram por 70%x50%, 70%x70%, 80%x80%. Contudo, no Quadro 1 visualiza-se as formas e interações das variáveis fotogramétricas de planejamento, captura e processamento desses dados.

Quadro 1. Formas e interações das variáveis fotogramétricas.

GSD	1,5cm			3,0cm		
	Sobr. de Imagens	70%x50%	70%x70%	80%x80%	70%x50%	70%x70%
Produtos Fotogramet. (Método)	1	2	3	4	5	6

1.2.2.2.1. Planejamento de Voos Autônomos

Os planejamentos dos voos autônomos foram feitos a partir do *Software Mission Planner*, onde foi configurado e delimitado a área de sobrevoo de forma a garantir que fosse recoberto toda a área de estudos e ainda, adicionando a essa área, uma margem de erro de 20 metros para fora a partir da borda limite, como pode ser observado na Figura 3.

Figura 3. Área de estudo com Planejamento de voo autônomo com margem excedente de 20 metros.



As velocidades predefinidas para a execução dos voos foram estipuladas em 7 m/s (aproximadamente 25,2 km/h). As porcentagens de sobreposição frontal e lateral foram configuradas de forma a atender os objetivos da variável sobreposição de imagens anteriormente citadas conformadas ('70%x50%', '70%x70%' e '80%x80%').

As configurações das alturas dos voos também consistiram com alternâncias, conformando-se com os dois níveis da variável GSD, dispondo-se em 30 metros de altura (para os planos de voo com GSD de '1,5cm') e 60 metros de altura (para os planos de voo com GSD de '3,0cm'), os quais encontram-se dentro do regulamento espacial da ANAC com regras gerais para o uso civil de aeronaves não tripuladas no Brasil.

Contudo foi utilizada a equação proposta por Falkner (1995) para cálculo de área de recobrimento de uma determinada imagem obtidas por aerofotogrametria:

$$Ac = \left(\frac{Av}{Df} \times Ls \right) \times \left(\frac{Av}{Df} \times Cs \right) \quad \text{Eq.01}$$

Onde:

A_c = Área coberta;

A_v = Altura do voo em relação ao solo;

D_f = Distância focal;

l_s = Largura do sensor;

C_s = Comprimento do sensor.

1.2.2.2. Execução de Voos Autônomos

Os levantamentos de campo foram executados nos dias 24 e 25 de setembro de 2018, para tanto foram posicionados os alvos exatamente em cima dos pontos de controle, na sequência foram tomadas as medidas e processos de preparação e configuração do equipamento para execução e mapeamento aéreo.

As imagens aéreas foram obtidas por meio de Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) do tipo multirrotor (Quadrirrotor), modelo 3DR Solo (Figura 4).

Os comandos de voos foram realizados nos três eixos, podendo ser para frente e para trás (*Pitch*), direita e esquerda (*Roll*), para cima e para baixo (*Elevator*) e rotação no próprio eixo para direita e esquerda (*Yaw*). A plataforma do RPA possui um sistema embutido denominado *Inertial Measurement Unit* (IMU) que possibilita o controle da altitude através de um sensor de inércia e um altímetro barométrico. O sistema *Compass* realiza a leitura da informação geomagnética com o auxílio do Sistema de Posicionamento Global (GPS - *Global Position System*) aumentando a acurácia do cálculo da posição e altura do RPA.

Figura 4. RPA do tipo multirroto 3DR Solo.



As missões produziram algumas centenas de imagens aéreas que foram disponibilizadas no formato *JPEG*, incluindo arquivos acessórios de sincronização de cada cena, conferindo às mesmas um ponto de amarração de coordenada geográfica (latitude, longitude e altitude), com *datum* SIRGAS 2000. Foram realizadas coletas de pontos de controle por meio de receptor GPS, seguindo o processo de retificação das imagens, calibrando os mosaicos no sentido do georreferenciamento das mesmas e melhoria da acurácia do posicionamento do resultado final dos produtos (Ortomosaicos e Modelo 3D).

Foram gerados diversos Ortomosaicos e MDTs por meio de imagens de alta resolução, os mesmos oriundos de composição de imagens na região do visível (RGB), utilizando o sensor *Mapir Survey 3W RGB*, o qual também é conectado com o sensor *Mapir Survey3W NIR/InfraRED* (Figuras 5 e 6), ambas com resolução de 12.1 megapixels.

Figura 5. Sensores *Mapir 3 RGB* e *Mapir 3 NIR/InfraRED*.



Figura 6. Sensores *Mapir 3 RGB* e *Mapir 3 NIR/InfraRED* acoplados ao RPA 3DR Solo.



Com esses sensores combinados é possível ser feita uma coleta de imagens que podem gerar dados e produtos multiespectrais com GSD de até 1,0cm.

Contudo, após processamento das imagens no software Metashape, foram obtidos os produtos cartográficos na forma de MDT, oriundos dos diferentes voos com suas distintas variáveis, foi possível ser feita a extração dos dados/cotas topográficas referentes aos 370 pontos distribuídos na área de estudo, para posterior comparação e análise estatística com os dados procedentes do método por GNSS.

Para isso os MDTs foram levados a um *software* de geoprocessamento (QGIS), no qual foi feita extração dos dados topográficos para os pontos através da ferramenta/*plug-in Point Sampling*, que extrai a informação de um Raster (MDTs dos voos) e imprime na tabela de atributos de um arquivo vetorial de pontos já existente (*shapefile* dos 370 pontos cotados).

1.2.3. Análises estatísticas

Foram exploradas as relações entre os dados de 'Cotas Topográficas', extraídos em métodos por 'Aerofotogrametria com RPA' e por 'GNSS/RTK', para serem levados e executados aos processos de análises estatísticas necessárias para a construção da pesquisa.

Para tanto, foram empregados os métodos estatísticos por Análise de Variância (*Analysis of Variance* - ANOVA) e análise por Correlação de Pearson.

I. ANOVA

Executa-se uma análise de variância de um fator, neste caso para a variável 'Erro de Cotas' (expresso em mm) das variáveis estudadas (GSD e Sobreposição). Constrói-se vários testes e gráficos para comparar os valores médios dos dados estudados (Erro de Costas) para os níveis diferentes de cada variável aplicada (GSD, Sobreposição e GSD+Sobreposição).

Neste sentido, o teste 'F' na tabela ANOVA determina se há diferenças significativas entre as médias. Se há diferença, os testes de intervalo múltiplo informam quais meios são significativamente diferentes dos outros. Quando há a diferença significativa e, caso da não confiabilidade dos dados (por discrepâncias dos valores das médias pela tabela ANOVA), pode ser usado para análise o teste de Kruskal-Wallis, que compara as medianas em vez das médias, validando a análise.

Os diferentes gráficos deste método estatístico ajudam a julgar o significado prático dos resultados, bem como na procura de possíveis violações das hipóteses subjacentes na análise de variância.

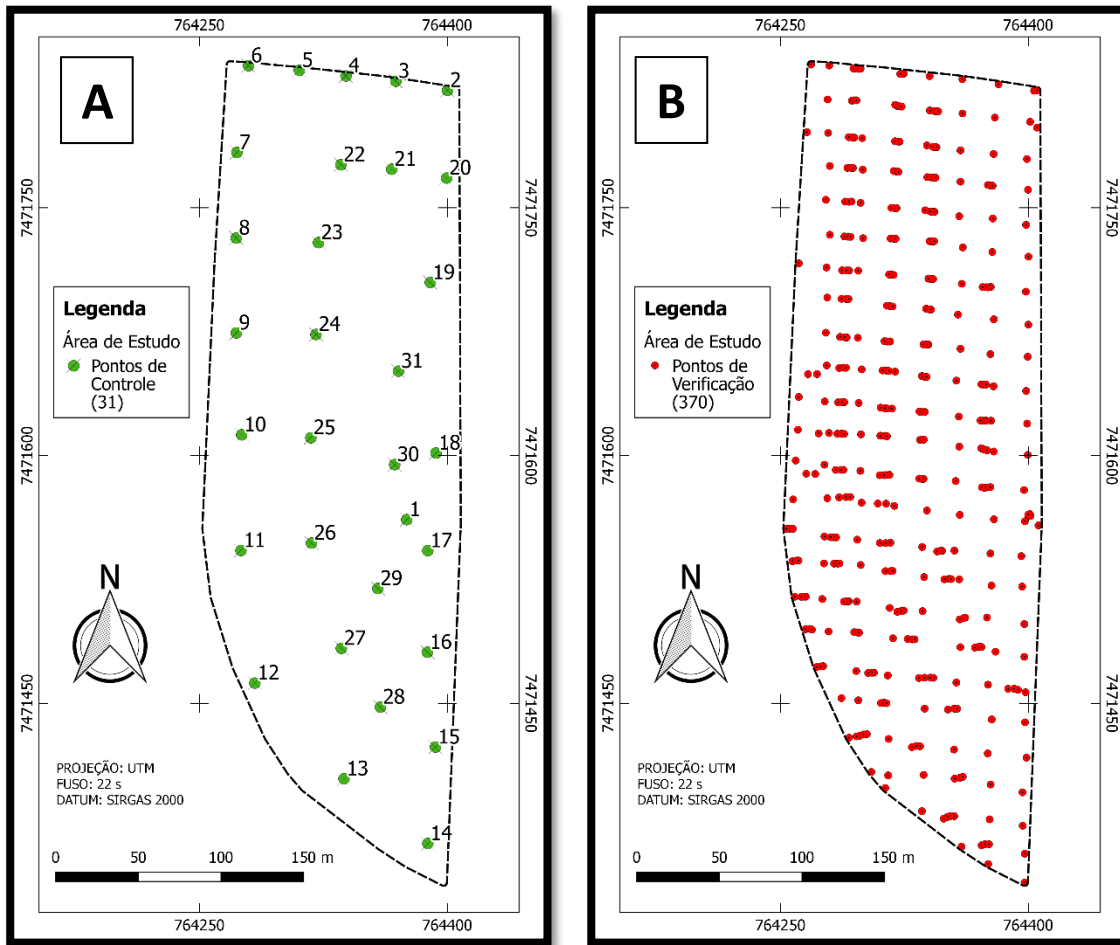
II. Correlação de Pearson

Este procedimento foi desenvolvido para resumir várias colunas de dados quantitativos. Calcula-se várias estatísticas, incluindo correlações, covariâncias e correlações parciais. Uma série de gráficos multivariados também é incluída no procedimento, fornecendo visualizações importantes dos dados.

1.3. Resultados

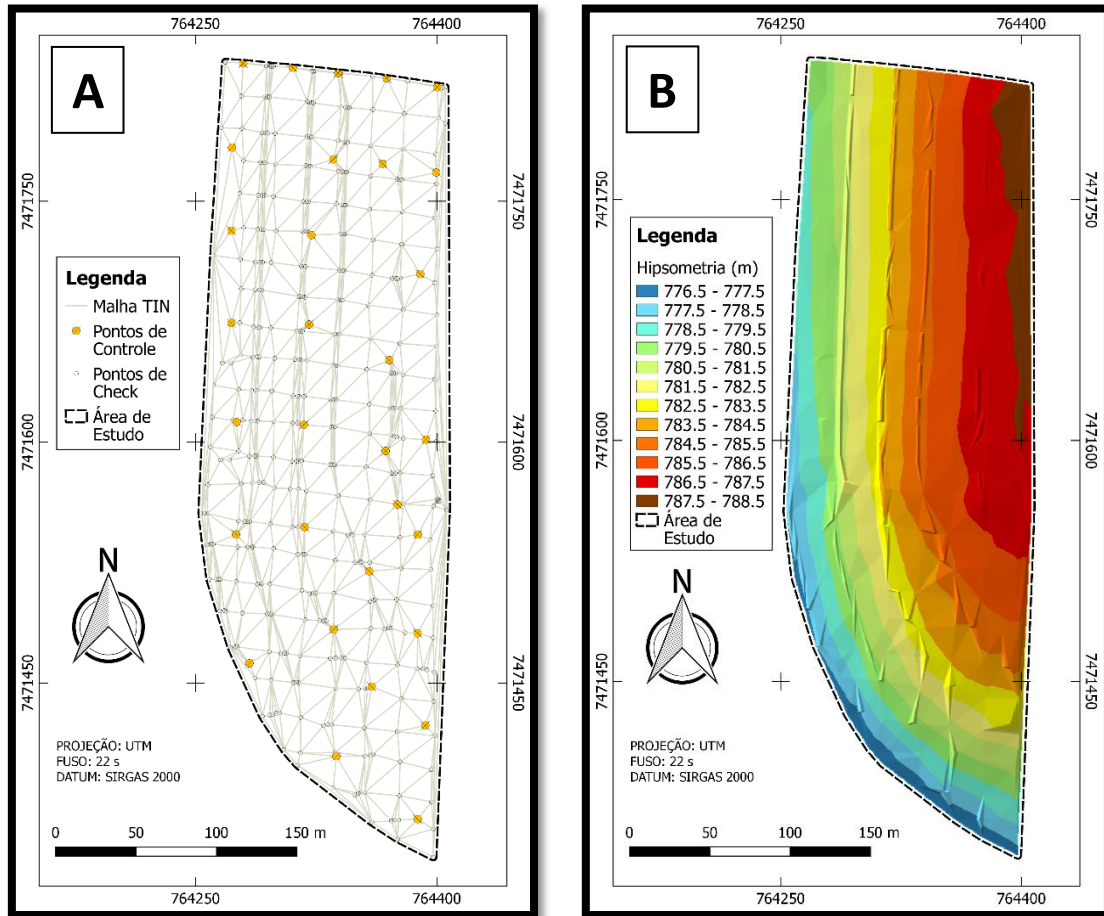
1.3.1. Topografia por GNSS/RTK

Por meio desta atividade de campo foi possível coletar 31 pontos de controle, com objetivo de distribuição homogênea (Figura 7-A), bem como a coleta de mais 370 pontos de verificação (*check points*) que podem ser observados da Figura 7-B, desta forma, a junção desses pontos se definiu em um produto final com uma malha que totaliza 401 pontos cotados georreferenciados, constituindo o levantamento topográfico Terrestre por GNSS RTK.

Figura 7. Pontos de Controle (A) e Pontos de Verificação (B).

Com essa malha densa de pontos cotados foi possível ser gerado uma base de produto topográfico planialtimétrico para a área de estudo, sendo assim este levantamento topográfico planialtimétrico, e conseqüente modelo tridimensional, se determina como o produto de referência de comparação incontroversa e assegurada deste estudo (Figura 8).

Figura 8. Pontos e Malha triangular (TIN) com Modelo 3D (A). Modelo e levantamento topográfico planialtimétrico (hypsometria) da área de estudo (B).



1.3.2. Topografia por Aerofotogrametria com RPA

Foram obtidos resultados e produtos fotogramétricos distintos para cada combinação das variáveis analisadas (GSD e Sobreposição de imagens), dispostos na Tabela 1, constando os dados e valores de nuvens de pontos, tempo de processamento, GSD, RMSE (*Root-Mean-Square Error*, que expressa a acurácia dos resultados), resolução do MDT e densidade das nuvens de pontos.

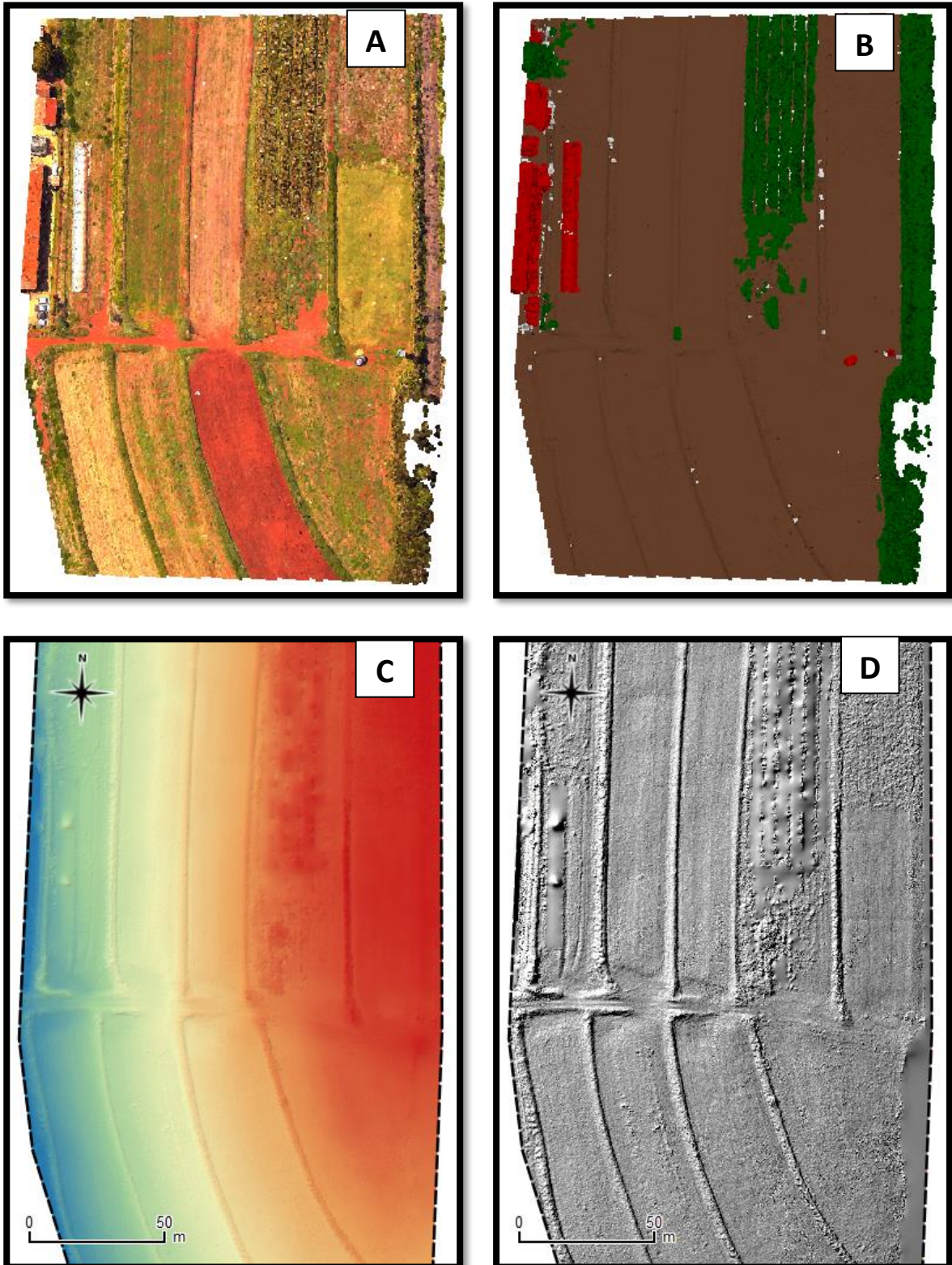
Tabela 1. Resultados dos levantamentos aerofotogramétricos por RPA

Produtos Fotogr.	GSD (cm)	Sobrepos.	Tempo de Processamento	Nuvem de Pontos	RMSE (m)	Resoluc. MDT (cm)	Densidade de Pontos (p/m ²)
1	1,5	70%x50%	31 min 38 sec	24.760.779	0,405	6,65	226,06
2	1,5	70%x70%	24 min 57 sec	25.331.316	0,484	6,57	231,46
3	1,5	80%x80%	43 min 10 sec	28.920.507	0,570	6,35	247,62
4	3,0	70%x50%	6 min 5 sec	7.117.785	0,413	12,20	67,28
5	3,0	70%x70%	8 min 26 sec	7.817.444	0,387	12,10	67,75
6	3,0	80%x80%	15 min 31 sec	7.781.147	0,559	12,30	65,82

Para tanto, como podem ser observados na Figura 9, foram gerados para cada produto fotogramétrico, oriundos da combinação das variáveis analisadas (GSD e Sobreposição), os seguintes produtos cartográficos: (a) Nuvem de pontos 3D, (b) Nuvem de pontos classificada, (c) DEM MDT, (d) DEM Relevo sombreado.

Os mesmos foram utilizados para compor parte do banco de dados cartográficos topográficos, correspondente aos métodos por aerolevantamentos com RPA, para posterior confrontação e análises com os demais produtos por parte da topografia.

Figura 9. Detalhe dos produtos cartográficos obtidos: (A) Nuvem de pontos 3D, (B) Nuvem de pontos classificada, (C) DEM MDT, (D) DEM Relevo sombreado.



1.3.3. Análise comparativa entre topografia por GNSS/RTK e Aerofotogrametria com RPA

O levantamento topográfico por meio de GNSS/RTK, foi utilizado como dado de testemunha para efeito de comparação com os valores topográficos oriundos dos aerolevamentos por RPA para estudo dos métodos (Quadro 1). Em seguida foram extraídos os dados de 'Cotas Topográficas' para cada referido ponto com os seis Produtos Fotogramétricos resultantes das duas variáveis combinadas (GSD + Sobreposição) e dispostos na Tabela 2 para comparação.

Tabela 2. Cotas altimétricas dos pontos obtidos por GNSS/RTK e por MDTs dos métodos de levantamento aéreo.

AMUESTRA / NOMBRE	COTAS GNSS	70x50 / 1,5	70x70 / 1,5	80x80 / 1,5	70x50 / 3,0	70x70 / 3,0	80x80 / 3,0
1	788.411	788.450	788.371	788.399	789.249	788.700	788.461
2	786.916	786.988	786.937	787.059	787.793	787.264	786.973
3	785.867	785.761	785.856	785.785	786.554	786.095	785.797
4	784.867	784.881	784.973	784.912	785.490	785.149	784.832
5	783.746	783.741	783.848	783.767	784.502	784.107	783.755
6	784.063	783.917	783.968	783.921	784.592	784.182	783.907
7	783.665	783.577	783.696	783.643	784.456	783.952	783.679
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
368	778.397	778.367	778.335	778.378	781.134	779.051	778.477
369	776.978	776.942	776.973	777.058	778.397	777.900	777.216
370	776.814	776.945	776.863	776.947	779.693	777.681	776.922

Para o estudo e as análises por ANOVA (Análise de Variância) foram aplicadas a diferença absoluta entre os dados de GNSS e os dados altimétricos dos produtos fotogramétricos (GSD e Sobreposição), obtendo-se assim os valores de 'Erro de Cota' para cada ponto disposto e distribuído na área de estudo (Tabela 3).

Para tanto foram estudadas e analisadas as variáveis dos métodos de aerolevamentos com RPAs (GSD e Sobreposição) que interferem diretamente na qualidade final do produto fotogramétrico. Desta forma as variáveis GSD e sobreposição foram analisadas de forma individual e, posteriormente, as variáveis foram analisadas de forma combinada, constituindo uma análise completa dos métodos de levantamento. Desta maneira cada variável foi constituída pelos seguintes níveis: GSD composto por '1,5' e '3,0'; Sobreposição por '70x50', '70x70' e '80x80';

Variáveis combinadas constituindo o Método por '70x50-1.5', '70x70-1.5', '80x80-1.5', '70x50-3.0', '70x70-3.0' e '80x80-3.0'.

Tabela 3. Diferencial de Erros Absolutos e disposição dos dados para estudo e análises por ANOVA.

Amostra	Nome	GSD (cm)	Sobrep. (%)	Método (% / cm)	Cota GNSS (mm)	Cota RPA (mm)	Dif. Cota (mm)	Dif. Abs. Cota (mm)
1	1	1,5	70x50	70x50/1,5	788.411	788.450	39	39
2	2	1,5	70x50	70x50/1,5	786.916	786.988	72	72
3	3	1,5	70x50	70x50/1,5	785.867	785.761	-106	106
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
369	369	1,5	70x50	70x50/1,5	776.978	776.942	-36	36
370	370	1,5	70x50	70x50/1,5	776.814	776.945	131	131
371	1	1,5	70x70	70x70/1,5	788.411	788.371	-40	40
372	2	1,5	70x70	70x70/1,5	786.916	786.937	21	21
373	3	1,5	70x70	70x70/1,5	785.867	785.856	-11	11
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
739	369	1,5	70x70	70x70/1,5	776.978	776.973	-5	5
740	370	1,5	70x70	70x70/1,5	776.814	776.863	49	49
741	1	1,5	80x80	80x80/1,5	788.411	788.399	-12	12
742	2	1,5	80x80	80x80/1,5	786.916	787.059	143	143
743	3	1,5	80x80	80x80/1,5	785.867	785.785	-82	82
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
1109	369	1,5	80x80	80x80/1,5	776.978	777.058	80	80
1110	370	1,5	80x80	80x80/1,5	776.814	776.947	133	133
1111	1	3,0	70x50	70x50/3,0	788.411	789.249	838	838
1112	2	3,0	70x50	70x50/3,0	786.916	787.793	877	877
1113	3	3,0	70x50	70x50/3,0	785.867	786.554	687	687
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
1479	369	3,0	70x50	70x50/3,0	776.978	778.397	1.419	1.419
1480	370	3,0	70x50	70x50/3,0	776.814	779.693	2.879	2.879
1481	1	3,0	70x70	70x70/3,0	788.411	788.700	289	289
1482	2	3,0	70x70	70x70/3,0	786.916	787.264	348	348
1483	3	3,0	70x70	70x70/3,0	785.867	786.095	228	228
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
1849	369	3,0	70x70	70x70/3,0	776.978	777.900	922	922
1850	370	3,0	70x70	70x70/3,0	776.814	777.681	867	867
1851	1	3,0	80x80	80x80/3,0	788.411	788.461	50	50
1852	2	3,0	80x80	80x80/3,0	786.916	786.973	57	57
1853	3	3,0	80x80	80x80/3,0	785.867	785.797	-70	70
(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)	(...)
2219	369	3,0	80x80	80x80/3,0	776.978	777.216	238	238
2220	370	3,0	80x80	80x80/3,0	776.814	776.922	108	108

1.3.3.1. Método estatístico ANOVA para GSD

Como pode ser observado no método estatístico ANOVA para GSD (Tabela 4), a variação do 'Erro de Cotas' por GSD foi dividida em dois componentes: um componente entre grupos e um outro componente incluso nos grupos.

A razão F, que neste caso é igual a 112.114, resulta da estimativa entre grupos e a estimativa inserida nos grupos.

Como o valor P referente a razão F é menos que 0,05, apresenta uma diferença estatisticamente significativa entre os dados de 'Erro de Cotas' (em mm) para as duas (2) variáveis de GSD estudadas (1,5 cm e 3,0 cm), com um nível de confiança de 95,0%.

Tabela 4. ANOVA para Diferencial Absoluto (Erro) de Cotas por GSD.

Fonte	Soma dos Quadrados	GI	Quadrado Médio	Razão-F	Valor-P
Entre grupos	3.05541E6	1	3.05541E6	112.11	0.0000
Intra grupos	6.04463E7	2218	27252.6		
Total (Corr.)	6.35017E7	2219			

1.3.3.1.1. Testes de Múltiplas Classes para 'Erro de Cotas' por GSD

Aplicando um procedimento de comparação múltipla para determinar quais médias são significativamente diferentes das outras, foi observado diferenças entre as médias de 'Erro de Cotas' para os valores de GSD 1,5 cm e 3,0 cm, apresentando diferenças estatisticamente significantes, com um nível de confiança de 95,0%.

No procedimento de diferença mínima significativa (*Least Significant Difference* - LSD) de Fisher usado para discriminação entre as médias dos 'Erros de Cotas' resultantes dos dois (2) GSDs (1,5 cm e 3,0 cm) foi identificado resultados de dois (2) grupos homogêneos (Tabela 5), de acordo com o alinhamento dos "Xs" nas colunas, nas quais os níveis não compartilhando o mesmo alinhamento e estão dispostos em colunas distintas, constatando um grupo homogêneo para cada valor de GSD utilizado.

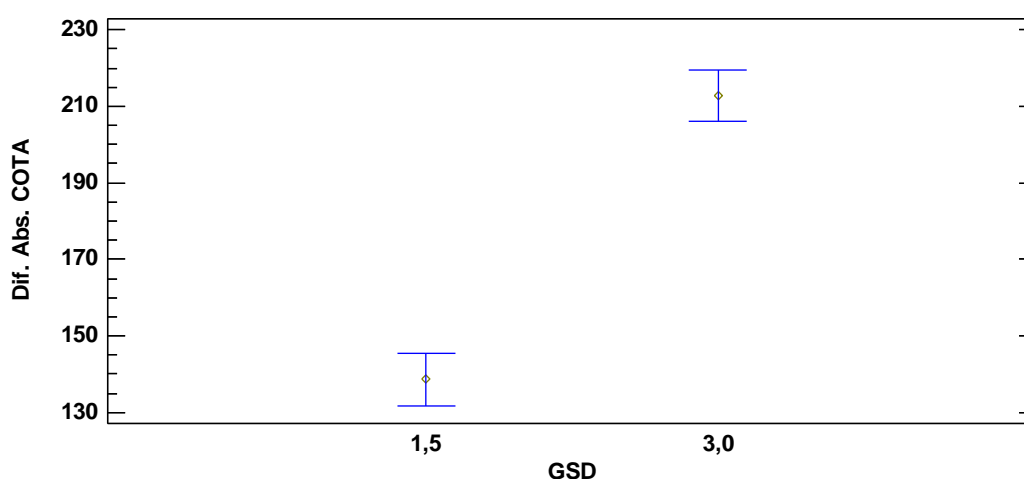
Desta forma há diferenças estatisticamente significativas entre os níveis de GSD, como podem ser observadas também no gráfico comparativo de diferenças

estatisticamente significativas (Figura 10). Fato que constitui que a altura do voo interfere e/ou confere qualidade no resultado final do produto.

Tabela 5. Identificação de grupos Homogêneos para níveis da variável GSD

GSD	Casos	Média (mm)	Grupos Homogêneos
1,5	1110	138.621	X
3,0	1110	212.818	X

Figura 10. Gráfico comparativo de diferenças estatisticamente significativas de Erros Absolutos em Cotas Altimétricas para os níveis da variável GSD.



1.3.3.1.2. Teste de Kruskal-Wallis para 'Erro de Cotas' por 'GSD'

Os 'Erros de Cotas' para as duas (2) variáveis de GSD estudadas (1,5 cm e 3,0 cm), também demonstraram diferença estatística significativa para o método estático Kruskal-Wallis ($P < 0.05$), com confiança de 95,0% (Tabela 6), desta forma houve diferença entre variáveis de GSD utilizadas.

Tabela 6. Teste de Kruskal-Wallis para Diferencial Absoluto (Erro) de Cotas por GSD.

GSD	Tamanho da Amostra	Intervalo médio
1,5	1110	998.559
3,0	1110	1222.44

Estatístico = 67.7044 Valor-P = 0

1.3.3.2. Método estatístico ANOVA para Sobreposição

Como pode ser observado no método estatístico ANOVA para Sobreposição (Tabela 7), a variação do ‘Erro de Cotas’ por Sobreposição foi dividida em dois componentes: um componente entre grupos e um outro componente incluso nos grupos.

A razão F, que neste caso é igual a 96.25, resulta da estimativa entre grupos e a estimativa inserida nos grupos.

Como o valor P referente a razão F é menor que 0,05, apresenta uma diferença estatisticamente significativa entre os dados de ‘Erro de Cotas’ (em mm) para as três (3) variáveis de sobreposição estudadas (70x50, 70x70 e 80x80), com um nível de confiança de 95,0%.

Tabela 7. ANOVA para Diferencial Absoluto (Erro) de Cotas por Sobreposição.

Fonte	Soma dos Quadrados	GI	Quadrado Médio	Razão-F	Valor-P
Entre grupos	5.07348E6	2	2.53674E6	96.25	0.0000
Intra grupos	5.84283E7	2217	26354.7		
Total (Corr.)	6.35017E7	2219			

1.3.3.2.1 Testes de múltiplas classes para ‘Erro de Cotas’ por sobreposição

Através da metodologia de comparação múltipla, com um nível de confiança de 95,0%, foram observadas diferenças estatisticamente significantes entre as médias de ‘Erro de Cotas’ para os três (3) níveis da variável Sobreposição (‘70x50’, ‘70x70’ e ‘80x80’).

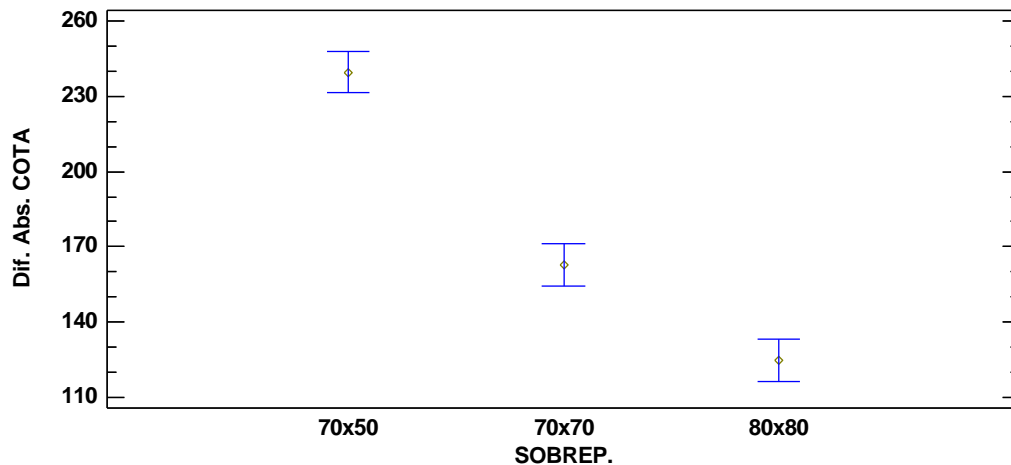
No procedimento de diferença mínima significativa (LSD) de Fisher usado para discriminação entre as médias dos ‘Erros de Cotas’ resultantes dos três (3) parâmetros de Sobreposição (70x50, 70x70 e 80x80) foram identificados três (3) grupos homogêneos (Tabela 8), de acordo com o alinhamento dos “Xs” nas colunas, nas quais os níveis não compartilhando do mesmo alinhamento e estão dispostos em colunas distintas, constatando um grupo homogêneo para cada parâmetro de Sobreposição utilizado.

Desta forma há diferenças estatisticamente significativas entre os três (3) níveis, como podem ser observadas também no gráfico comparativo de diferenças estatisticamente significativas (Figura 11).

Tabela 8. Identificação de grupos Homogêneos para níveis da variável Sobreposição.

Sobreposição	Casos	Média (mm)	Grupos Homogêneos
80x80	740	124.704	X
70x70	740	162.807	X
70x50	740	239.647	X

Figura 11. Gráfico comparativo de diferenças estatisticamente significativas de Erros Absolutos em Cotas Altimétricas para os níveis da variável Sobreposição.



1.3.3.2.2. Teste de Kruskal-Wallis para 'Erro de Cotas' por Sobreposição

Os 'Erros de Cotas' para as três (3) variáveis de Sobreposição estudadas (70x50, 70x70 e 80x80), também demonstraram diferença estatística significativa para o método estático Kruskal-Wallis ($P < 0.05$), com confiança de 95,0% (Tabela 9), desta forma existindo diferenças entre as variáveis de Sobreposição utilizadas.

Tabela 9. Teste de Kruskal-Wallis para Diferencial Absoluto (Erro) de Cotas por Sobreposição.

Sobreposição.	Tamanho da Amostra	Intervalo médio
70x50	740	1329.05
70x70	740	1079.75
80x80	740	922.71

Estatístico = 151.24 Valor-P = 0

1.3.3.3. Estatística ANOVA para ‘Erro de Cotas’ por ‘Métodos’ (GSD + Sobreposição)

Como pode ser observado no processo estatístico ANOVA para Sobreposição (Tabela 10), a variação do ‘Erro de Cotas’ por combinações de ‘variáveis’ (GSD + Sobreposição) foi dividida em dois componentes: um componente entre grupos e um outro componente incluso nos grupos.

A razão F, que neste caso é igual a 88.19, resulta da estimativa entre grupos e a estimativa inserida nos grupos.

Como o valor P referente a razão F é menor que 0,05, apresenta uma diferença estatisticamente significativa entre os dados de ‘Erro de Cotas’ (em mm) para as seis (6) variáveis estudadas, resultantes da combinação entre os parâmetros de GSD e Sobreposição (70x50-1.5, 70x70-1.5, 80x80-1.5, 70x50-3.0, 70x70-3.0 e 80x80-3.0), com um nível de confiança de 95,0%.

Tabela 10. ANOVA para Diferencial Absoluto (Erro) de Cotas por Método (GSD + Sobreposição)

Fonte	Soma dos Quadrados	Gl	Quadrado Médio	Razão-F	Valor-P
Entre grupos	1.05463E7	5	2.10926E6	88.19	0.0000
Intra grupos	5.29555E7	2214	23918.5		
Total (Corr.)	6.35017E7	2219			

1.3.3.3.1 Testes de Múltiplas Classes para ‘Erro de Cotas’ por ‘Métodos’ (GSD + Sobreposição)

Para determinar quais médias de cada método são significativamente diferentes das outras, foi aplicado um processo de comparação múltipla, com o qual foi possível observar diferenças estatisticamente significantes em nove (9) dos doze

(12) pares de médias, com um nível de confiança de 95,0%. Conseqüentemente três (3) dos doze (12) pares não apresentam diferenças estatisticamente significantes.

No procedimento de diferença mínima significativa (LSD) de Fisher, usado para discriminação entre as médias dos 'Erros de Cotas' resultantes das seis (6) combinações dos parâmetros de GSD e Sobreposição (70x50-1.5, 70x70-1.5, 80x80-1.5, 70x50-3.0, 70x70-3.0 e 80x80-3.0), foi identificado resultados de quatro (4) grupos homogêneos (Tabela 11), de acordo com o alinhamento dos "Xs" nas colunas, nas quais três (3) dos seis (6) métodos compartilhando do mesmo alinhamento e outros três (3) métodos não compartilham do mesmo alinhamento e estão dispostos em colunas distintas. Desta maneira foi constatado um grupo homogêneo para três (3) métodos e um grupo homogêneo para cada um dos outros três (3) métodos restantes, totalizando quatro (4) grupos homogêneos.

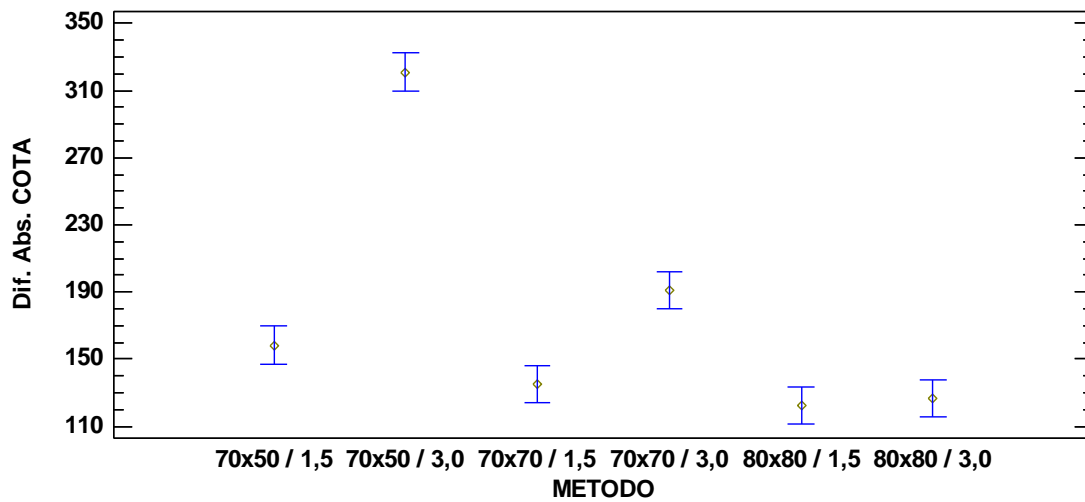
Entre os três (3) métodos que pertencem ao mesmo grupo (80x80-3.0, 80x80-1.5 e 70x70-1.5) não há diferença estatisticamente significativa.

Desta forma há diferenças estatisticamente significativas entre os quatro (4) grupos, como podem ser observadas também no gráfico comparativo de diferenças estatisticamente significativas (Figura 12).

Tabela 11. Identificação de grupos Homogêneos para níveis por Método (GSD + Sobreposição)

Método	Casos	Média (mm)	Grupos Homogêneos
80x80 / 1,5	370	122.673	X
80x80 / 3,0	370	126.735	X
70x70 / 1,5	370	134.841	X
70x50 / 1,5	370	158.349	X
70x70 / 3,0	370	190.773	X
70x50 / 3,0	370	320.946	X

Figura 12. Gráfico comparativo de diferenças estatisticamente significativas de Erros Absolutos em Cotas Altimétricas para os níveis por Método (GSD + Sobreposição).



1.3.3.3.2. Teste de Kruskal-Wallis para 'Erro de Cotas' por 'Métodos' (GSD + Sobreposição)

Os 'Erros de Cotas' para os seis (6) métodos estudados, resultantes da combinação entre os fatores de GSD e de Sobreposição (70x50-1,5; 70x70-1,5; 80x80-1,5; 70x50-3,0; 70x70-3,0 e 80x80-3,0), também demonstraram diferença estatística significativa para o método estático Kruskal-Wallis ($P < 0,05$), com confiança de 95,0% (Tabela 12), existindo assim diferenças entre as variáveis analisadas. Para o método estatístico de Kruskal-Wallis não há como ser feita distinção de quais as classes são estatisticamente diferentes umas das outras, porém essa distinção é possível ser observada no teste de Múltiplas Classes na Tabela 11 e na Figura 13 anteriormente analisadas.

Tabela 12. Teste de Kruskal-Wallis para Diferencial Absoluto (Erro) de Cotas por Métodos (GSD + Sobreposição).

Método	Tamanho da Amostra	Intervalo médio (mm)
70x50 / 1,5	370	1110.09
70x50 / 3,0	370	1548.00
70x70 / 1,5	370	981.68
70x70 / 3,0	370	1177.81
80x80 / 1,5	370	903.90
80x80 / 3,0	370	941.51

Estatístico = 255.538 Valor-P = 0

1.3.3.4. Correlação para GSD

Com o objetivo de análise dos parâmetros da variável GSD, aplicando o processo estatístico do Coeficiente de Correlação de Pearson, foram confrontados os valores de Cotas topográficas obtidas por GNSS com os valores topográficos alcançados por fotogrametria variando entre dois níveis de GSD ('1,5' e '3,0').

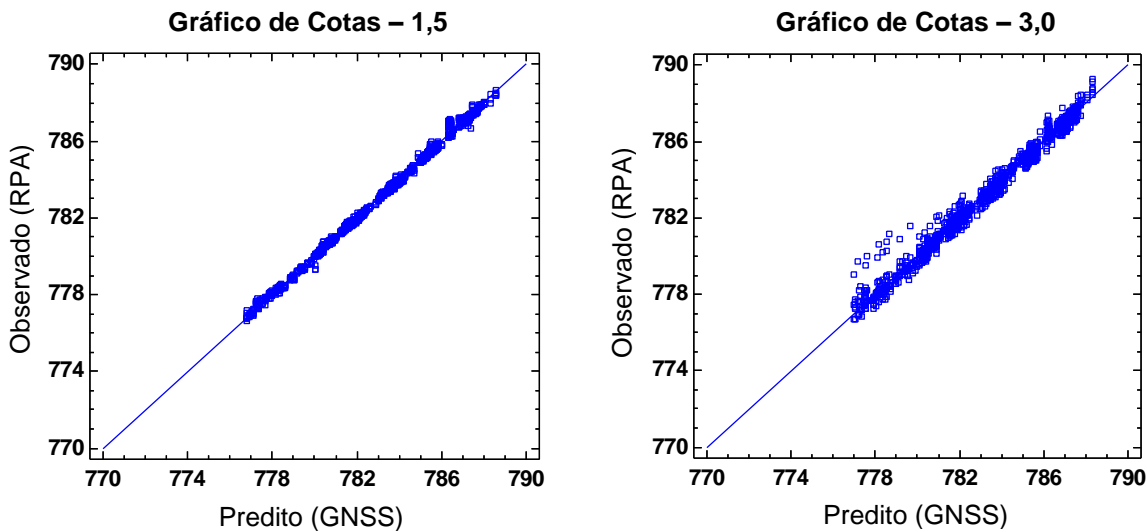
Foi observado correlação positiva entre os métodos de levantamento topográfico por GNSS e os dois parâmetros da variável GSD utilizados ('1,5' e '3,0'), com R^2 de 0,9989 para o GSD de '1,5' e 0,9919 para GSD de '3,0', podendo ser observados na Tabela 13, bem como expostos nos gráficos de correlação entre os valores de Cotas de GNSS e os parâmetros de GSD na Figura 13.

Os valores P, apresentam resultados abaixo de 0,05 para os dois (2) níveis de GSD, '1,5' e '3,0', indicando correlações significativamente diferentes de zero, com nível de confiança de 95,0%.

Tabela 13. Coeficiente de correlação entre as Cotas Altimétricas obtidas por RPA e GNSS/RTK para os níveis da variável GSD

GNSS/RTK	COTA RPA 1,5	COTA RPA 3,0
Correlação (R^2)	0,9989	0,9919
Tamanho da Amostra	(1110)	(1110)
Valor-P	0.0000	0.0000

Figura 13. Coeficiente de correlação entre as Cotas Altimétricas obtidas por RPA e GNSS/RTK para os níveis da variável GSD.



1.3.3.5. Correlação para Sobreposição

Para os estudos dos três (3) níveis da variável Sobreposição ('70x50', '70x70' e '80x80'), aplicando o processo estatístico do Coeficiente de Correlação de Pearson, foram confrontados os valores de cotas topográficas obtidas por GNSS com os valores topográficos alcançados por fotogrametria variando entre três parâmetros de Sobreposição.

Foi observado correlação positiva entre os métodos de levantamento topográfico por GNSS e os três (3) parâmetros da variável Sobreposição utilizados, com R^2 de 0,9891, 0,9980 e 0,9989 para as Sobreposições de '70x50', '70x70' e '80x80' respectivamente, podendo ser observados na Tabela 14, bem como expostos nos gráficos de correlação entre os valores de Cotas de GNSS e os parâmetros de Sobreposição na Figura 14.

Os valores P, apresentam resultados abaixo de 0,05 para os três (3) parâmetros de Sobreposição, indicando correlações significativamente diferentes de zero, com nível de confiança de 95,0%.

Tabela 14. Coeficiente de correlação entre as Cotas Altimétricas obtidas por RPA e GNSS/RTK para os níveis da variável Sobreposição

GNSS/RTK	COTA RPA 70x50	COTA RPA 70x70	COTA RPA 80x80
Correlação (R^2)	0,9891	0,9980	0,9989
Tamanho da Amostra	(740)	(740)	(740)
Valor-P	0,0000	0,0000	0,0000

Figura 14. Coeficiente de correlação entre as Cotas Altimétricas obtidas por RPA e GNSS/RTK para os níveis da variável Sobreposição.

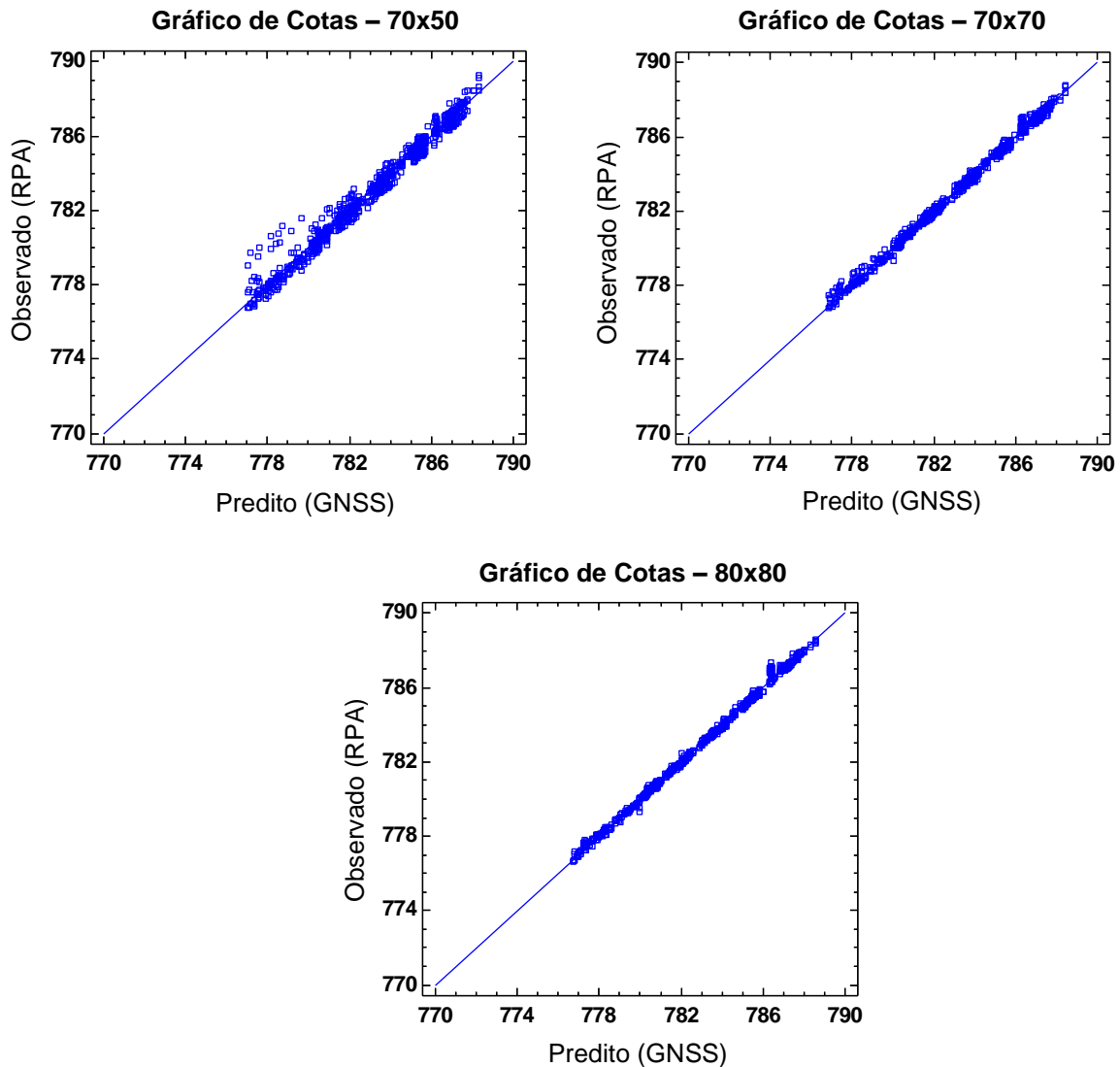
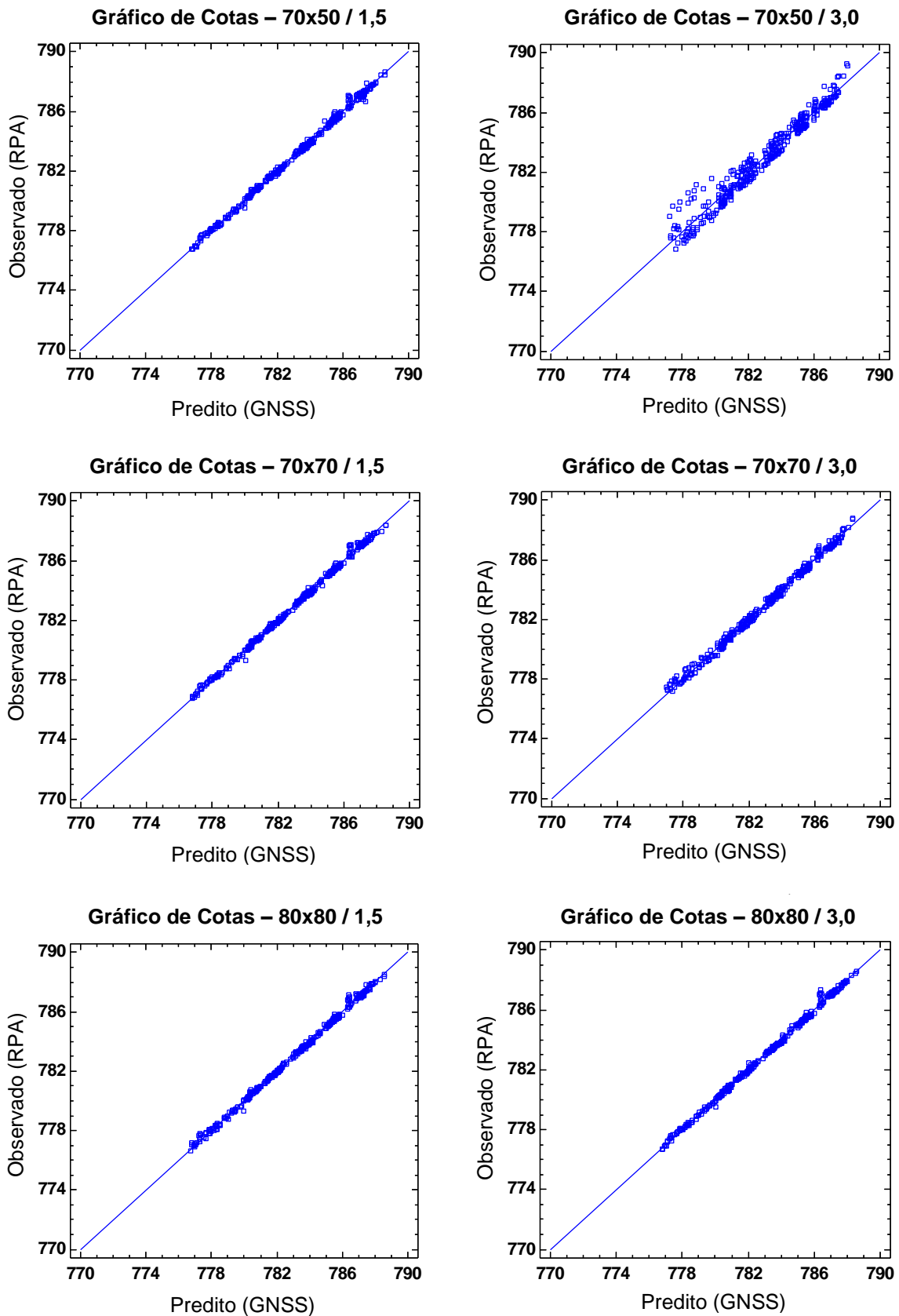


Figura 15. Coeficiente de correlação entre as Cotas Altimétricas obtidas por RPA e GNSS/RTK para os níveis por Método (GSD + Sobreposição).



1.4. Discussão

1.4.1. GSD

O valor P menor que 0,05 apresenta uma diferença estatisticamente significativa entre os dados de 'Erro de Cotas' para as duas (2) variáveis de GSD estudadas (1,5 cm e 3,0 cm).

Foram identificados dois (2) grupos homogêneos pela estatística LSD, demonstrando diferenças estatisticamente significativas entre os níveis de GSD e constatando um grupo homogêneo para cada nível. Apresentaram Erros Médios de 138.62mm para o GSD '1,5' e 212,81mm para o GSD '3,0'. O que implica que quanto melhor a resolução das imagens (GSD) maior o nível de detalhamento e consequentemente diminui o erro. Tal fenômeno também foi observado por Matias et al. (2015) em levantamentos aéreos com dois (2) grupos homogêneos de GSD, com resoluções na ordem de 5 cm e 10 cm, com erro médio de 0,029 m e 0,194 m, respectivamente, devido a variação na altitude de voo para mapeamento topográfico cadastral. A presença do maior erro médio em GSD de menor resolução está diretamente ligado a distância focal dos sensores utilizados, bem como sua relação com a altura de voo, influenciando diretamente na acurácia posicional dos respectivos mapeamentos.

Contudo, foi observado correlação positiva entre os dados de GNSS e os dois níveis da variável GSD, com R^2 de 0.9989 para o GSD de '1,5' e 0,9919 para GSD de '3,0', corroborando com resultados estatísticos de Yen et al. (2018) ao avaliar a técnica de levantamento topográfico com RPA multirrotor em comparação com dados de topografia terrestre por meio de estação total.

1.4.2. Sobreposição

O valor P menor que 0,05 apresenta diferença estatisticamente significativa para as três (3) variáveis de Sobreposição estudadas (70x50, 70x70 e 80x80). Foram identificados três (3) grupos homogêneos pela estatística LSD, evidenciando diferenças estatisticamente significativas entre os três (3) níveis e comprovando um grupo homogêneo para cada nível de Sobreposição.

Apresentaram Erros Médios de 239.65mm para '70x50', 162.81mm para o '70x70' e 124.70mm para o '80x80', o que demonstrou que quanto maior a taxa de sobreposição menor a probabilidade ao erro, demonstrado também no levantamento topográfico por meio de aerofotogrametria realizado nos estudos de Chen et al. (2018), James et al. (2017), Matias et al. (2015) e Yen et al. (2018) onde utilizaram blocos fotogramétricos semelhante ao presente trabalho.

Entretanto foi observado correlação positiva entre os dados de GNSS e os três (3) parâmetros da variável Sobreposição, com R^2 de 0.989, 0.998 e 0.999 para as Sobreposições de '70x50', '70x70' e '80x80' respectivamente. Este elevado grau de correlação nos três grupos se deu ao fato de uma distribuição uniforme dos pontos de controle (GCPs), bem como altitude de voo equivalente a escala do mapa topográfico proposto (AGÜERA-VEJA, et al., 2016; UYSAL et al., 2015).

1.4.3. Método

O valor P menor que 0,05 apresenta uma diferença estatisticamente significativa entre os dados de 'Erro de Cotas' (em mm) para as seis (6) variáveis estudadas, resultantes da combinação entre os parâmetros de GSD e Sobreposição ('70x50-1.5', '70x70-1.5', '80x80-1.5', '70x50-3.0', '70x70-3.0' e '80x80-3.0').

Foi identificado resultados de quatro (4) grupos homogêneos (LSD), constatando um grupo homogêneo para três (3) métodos e um grupo homogêneo para cada um dos outros três (3) métodos restantes, totalizando quatro (4) grupos Homogêneos. Ressalta-se que entre os três (3) métodos que pertencem ao mesmo grupo (80x80-3.0, 80x80-1.5 e 70x70-1.5) não havendo diferença estatisticamente significativa. Tais blocos fotogramétricos encontram-se dentro da faixa aceitável de precisão para planejamento espacial em projetos de engenharia (AGÜERA-VEGA et al., 2017; LAWALI e WAZIRI, 2014; ELTNER, et al., 2014).

Foi observado correlação positiva para todos as seis (6) combinações utilizadas, com R^2 variando entre 0,9799 e 0,9990,

Se contraindica o método com GSD de 3,0 e sobreposição de 70%x50%, o qual apresentou Erros Médios com extrema discrepância dos demais métodos analisados, mesmo com uma uniformidade na distribuição de pontos de controle (GCPs). Diferentes configurações com baixa sobreposição e menos GSD podem contribuir

com erros, principalmente se houver acentuada flutuação topográfica do terreno avaliado (AJAYI et al., 2018; JAMES et al., 2017).

Harwin e Lucieer (2012) apontaram em seu estudo a precisão da nuvem de pontos gerada a partir de Imagens de RPA referente ao mapeamento de paisagem natural com precisões de GSD na ordem de 2,5 cm quando o planejamento do voo garantiu um alto grau sobreposição (95% frontal e 70% lateral), ajustados com elevado número de pontos de controle em solo e uma distribuição uniforme por todo perímetro estudado. O bloco fotogramétrico utilizado por Harwin e Lucieer (2012), bem como seus respectivos resultados acurados, se aproximam dos grupos (80x80-3,0; 80x80-1,5 e 70x70-1,5) apresentados no presente trabalho, possuindo assim uma faixa segura de precisão na geração de produtos cartográficos confiáveis.

1.5. Conclusão

As classes de GSD, com os equipamentos utilizados neste trabalho, apresentaram Erros Médios de 138.62mm para o '1.5cm' e 212.81mm para '3.0cm'. O que implica que quanto melhor a resolução das imagens (GSD) maior o nível de detalhamento e conseqüente diminuição do erro no modelo topográfico.

A taxa de Sobreposição '80x80' demonstrou melhor desempenho que as '70x70', sendo seguida pelo nível '70x50', as quais apresentaram Erros Médios de 124,70mm, 162,81mm e 239,65mm respectivamente. Isso evidencia que quanto maior a taxa de sobreposição menor a probabilidade ao Erro no modelo topográfico.

Os métodos '80x80-1,5'; '80x80-3,0' e '70x70-1,5' não apresentaram diferença estatisticamente significativa (122.67mm, 126.73mm e 134.84mm de Erro Médio respectivamente), bem como sendo observados resultados mais favoráveis para mapeamentos aerofotogramétricos que os métodos '70x50-1,5'; '70x70-3,0' e '70x50-3,0' que se distribuem em grupos distintos e apresentam Erros Médios de 158,35mm, 190,77mm e 320,95mm respectivamente.

Se contraindica levantamentos com baixo aporte de dados de GSD e de Sobreposição, os quais podem apresentar Erros Médios severos comparados aos levantamentos com apreciável volume de dados.

Apesar dos valores das análises de variância, os estudos por correlação demonstraram R^2 que variam desde 0.9799 em seu valor mínimo e 0.9990 em seu

valor máximo, incluindo todos os métodos em uma condição extremamente aceitável do ponto de vista de comparação direta dos valores de cotas.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao CNPq e a CAPES por viabilizarem os estudos do primeiro autor no Brasil (Bolsa de Doutorado - N° do Processo: 142067/2016-4) e na Espanha (Programa de doutorado Sanduiche no exterior-PDSE - N° do Processo: 88881.190461/2018-01), ao professor Manuel Esteban da Universidade de Castilla La Mancha por possibilitar aprendizados e conhecimento no período de Doutorado Sanduiche no exterior, ao professor Sergio Campo pela Orientação no Brasil bem como ao Claudio Lopes Carvalho da empresa Projetos Pentágono por conceder gentilmente seu equipamento e equipe para levantamento topográfico terrestre com GNSS RTK.

REFERÊNCIAS

AGÜERA-VEGA, F., CARVAJAL-RAMÍREZ, F., MARTÍNEZ-CARRICONDO, P. Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle. **Measurement**. 98, 221–227, 2017.

AJAYI O.G., ROBSON S., PALMER, M., SALUBI, A. A. Modelling farmland topography for suitable site selection of dam construction using unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**. 11, 220–230, 2018.

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. Instrução Suplementar - IS N° 21-002 Revisão A, de 4 de outubro de 2012. Orienta a emissão de Certificado de Autorização de Voo Experimental com base no Regulamento Brasileiro da Aviação Civil n° 21 – RBAC 21 para Veículos Aéreos Não Tripulados – VANT. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 05 out. 2012. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/iac-e-is/is/is-21-002a/@@display-file/arquivo_norma/IS%2021-002A.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2018.

CHEN, B., YANG, Y., WEN, H., RUAN, H., ZHOU, Z., LUO, K., ZHONG, F. High-resolution monitoring of - Beach topography and its change using unmanned aerial vehicle imagery. **Ocean and Coastal Management**. 160, 103–116, 2018.

COLOMINA, I., MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review, *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 92, 79–97. 2014.

ELTNER, A., BAUMGART, P., MAAS, H., FAUST, R. Multi-temporal data for automatic measurement of rill and interrill erosion on losses soil, *Earth Surface Process. Land.* 40 (6), 741–755. 2014.

FALKNER, E. **Aerial Mapping. Methods and Applications**, Boca Raton. 1ed. 322p, 1995.

HARWIN, S., LUCIEER, A. Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery. *Remote Sensing*, v4, 1573-1599. 2012.

JAMES M.R., ROBSON S., D'OLEIRE-OLTMANN S., NIETHAMMER, U. OPTIMISING UAV topographic surveys processed with structure-from-motion: Ground control quality, quantity and bundle adjustment. **Geomorphology.** 280, 51–66, 2017.

LAWALI, R., WAZIRI, A.D. Digital orthophoto generation with Aerial photographs. **Acad. J. Interdiscip. Stud.** 3, 2281–3993, 2014.

MATIAS, G. R. M., GUZATTO, M. P., SILVEIRA, P. G. **Mapeamento Topográfico Cadastral por Integração de Imagens Adquiridas com VANT a Técnicas Tradicionais.** 2015. 175 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RODRIGUES, B. T.; RODRIGUES, M. T.; CAMPOS, S.; CAMPOS, M.; TARUMOTO, M. B. Possibilidades e métodos de utilização no uso de DRONES/VANTS na agricultura. In: PUTTI, F. F.; SILVA, A. L. C.; GABRIEL FILHO, L. R. A. (Orgs). **Tecnologias em agricultura sustentável.** Tupã-SP: Editora ANAP - Associação Amigos da Natureza da Alta Paulista, 2017. p. 249-269.

TONKIN, T. N., MIDGLEY, N. G., GRAHAM, D. J., LABADZ, J. C. The potential of small unmanned aircraft systems and structure-from-motion for topographic surveys: a test of emerging integrated approaches at Cwm Idwal, North Wales. **Geomorphol.** 226, 35–43. 2014.

UYSAL, M., TOPRAK, A. S., POLAT, N. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill, **Measurement.** 73 539–54. 2015.

YEH, F., HUANG, C., HAN, J., GE, L. Modeling Slope Topography Using Unmanned Aerial Vehicle Image Technique. **Anais...** MATEC Web of Conferences, Bandung, Indonesia, 1-6. 2018.

CAPÍTULO 2

EFICIÊNCIA E PRECISÃO DE AEROFOTOGRAMÉTRIA POR RPAs NO CÁLCULO DE ACÚMULO DE SEDIMENTOS EM DIQUES DE RESTAURAÇÃO FLORESTAL.

Autor: Bruno Timóteo Rodrigues

RESUMO

O objetivo desse capítulo é propor uma metodologia para analisar a eficiência e precisão dos levantamentos aéreos realizados por Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) no cálculo de volume de sedimentos acumulados em diques de restauração florestal, confrontados aos métodos de levantamento topográfico com Estação Total e GNSS/RTK. O estudo foi realizado no sudeste da Espanha, mais especificamente nas montanhas do sul, entre os rios Mundo ao norte e o rio Segura ao sul, no recinto provincial de Albacete, inserido na região do incêndio da *Sierra Donceles*. O equipamento utilizado para o cálculo de volume de sedimentos por levantamento topográfico foi uma estação total e um dispositivo GNSS de alto desempenho. Para o cálculo de volume por Aerofotogrametria foi utilizado Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) do tipo multirrotor, embarcado com sensor RGB. Foi explorado as relações entre as variáveis 'volume de sedimentos' e/ou taxas de deposição, extraídos em métodos topográficos por 'Aerofotogrametria com RPA' e por 'Estação Total e GNSS', onde empregados os métodos estatísticos ANOVA simples, ANOVA Multifatorial, Correlação e Regressão Simples. Os levantamentos aerofotogramétricos apresentaram acurácia muito próximas aos métodos topográficos mais precisos propostos na literatura atual para modelagem topográfica de depósitos de sedimentos em diques de restauração, desta forma, não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre os métodos, pertencentes a apenas um (1) grupo homogêneo de acordo com o procedimento estatístico ANOVA - LSD (*Least Significant Difference*), com um nível de confiança de 95,0%, não existindo diferença entre os métodos de levantamento topográfico utilizados. Foi observado correlação significativa entre a topografia por RPA e GNSS, com R^2 na ordem de 0,986 entre os métodos e valor P abaixo de 0,05. Para o método de obtenção de dados por RPA, quanto maior o tamanho do objeto estudado (Volume) menor será a probabilidade de erro. Conseqüentemente, o Erro Padrão se torna um fator inversamente proporcional à variável Volume. O método de aerolevantamento por RPA, obteve-se uma densidade

de pontos com valores topográficos significativamente superior ao método topográfico por Estação total e GNSS RTK.

Palavras-chave: Levantamento Topográfico; Modelo Digital de Elevação; Volume de Sedimentos, Sensoriamento Remoto.

2.1. Introdução

A região mediterrânea é a mais fortemente afetada por incêndios florestais na Europa (MARTÍNEZ et al. 2009; SAN-MIGUEL-AYANZ et al. 2013), afetando de forma negativa na economia local (MAVSAR et al. 2012), bem como no funcionamento dos ecossistemas que povoam essa região (BOWMAN et al. 2009; PECHONY e SHINDELL 2010), por meio da erosão do solo (BENTO-GONÇALVES et al., 2011; BENTO-GONÇALVES et al., 2012). Na Europa Mediterrânica, os incêndios são considerados um desastre natural (CARVALHO et al. 2011; PECHONY e SHINDELL 2010), apesar da relação intrínseca existente entre o fogo e as condições mediterrânicas, uma vez que tal fenômeno também é reconhecido como um fator de formação de solo (CERTINI, 2014).

O efeito do fogo ao nível do solo relacionado à cobertura vegetal leva a uma alteração considerável do regime hidrológico, conseqüentemente, maior susceptibilidade à erosão, devido aumento no escoamento superficial (BORJA et al., 2012), relacionados com alterações químicas e biológicas devido à combustão da matéria orgânica. Contudo, os efeitos das queimas não se restringem apenas nos perímetros percorridos pelo fogo (FERREIRA et al., 2008), mas também por áreas localizadas a jusante da bacia hidrográfica devido ao comportamento da água e dos sedimentos transportados.

Com a insuficiência da vegetação devido à mudança da cobertura do solo realizado pelo fogo, a erosão hídrica configura um grave problema com implicações nos recursos do solo (RIESCO GARCÍA, 2015). O desmatamento de florestas, aumento das áreas de pastagem para criação de animais, bem como diversos tipos de mudança no uso e ocupação da terra, surgem também como fatores que potencializam a erosão, ameaçando a sustentabilidade desse sistema de uso da terra (PULIDO et al., 2018; HERGUIDO SEVILLANO et al., 2017). Os dois notórios

processos erosivos na paisagem mediterrânea são constituídos por lavagens em taludes (SCHNABEL et al., 2010; RUBIO DELGADO et al., 2018), e erosão de ravinas devido ao fluxo concentrado (GÓMEZ-GUTIÉRREZ et al., 2012; SCHNABEL et al., 2013).

Em um meio de características mediterrâneas, a exportação dos sedimentos e dos nutrientes normalmente acontece nos primeiros meses após os incêndios, desta forma, validando pesquisas e viabilizando a implementação de soluções que contenham as perdas de sedimentos (SHAKESBY et al., 1993; BENTO-GONÇALVES e COELHO, 1995; SHAKESBY et al., 1996; WALSH, 1998; BENTO-GONÇALVES et al. 2011; VEGA et al., 2010).

Diques de restauração são construídos em canais para reter sedimentos erodidos, desta forma, uma fonte útil de informação para entender o solo e suas respectivas taxas de erosão e fluxos de sedimentos, a fim de minimizar impactos nas infraestruturas a jusante da bacia hidrográfica (ALFONSO-TORREÑO et al., 2019; BOIX-FAYOS et al., 2008; CASTILLO et al., 2007; DÍAZ et al., 2004) bem como poluição da água, reduzindo cargas de sedimentos e cinzas remanescente das queimadas (NICHOLS et al., 2012). Além disso, pode ser encontrado na literatura alguns estudos que referem a influência das barragens/diques de controle e restauração em projetos de geomorfologia e hidrologia dinâmica em bacias hidrográficas (BOIX-FAYOS et al., 2007; NADEU et al., 2015; GONZALES-GUTIÉRREZ et al., 2018), como também sua capacidade de reter sedimentos (MEKONNEN et al., 2014; MEKONNEN et al., 2015; RAMOS-DIEZ et al., 2016) e seus efeitos na vegetação (BOMBINO et al., 2009).

O material sedimentar retido na parte posterior dos diques de restauração podem ser empregadas para determinar a geração de sedimentos compostos a montante por uma determinada bacia hidrográfica (WHITE et al., 1997; VERSTRAETEN e POESEN, 2002; BELLIN et al., 2011; BAADE et al., 2012).

As metodologias de mensuração geométricas equacionam os depósitos de sedimentos com parâmetros de forma, por meio de prisma (ABEDINI et al., 2012; DÍAZ et al. 2014), pirâmide (ROMERO-DÍAZ et al., 2007a) ou trapezoidal (trapézio) (BELLIN et al., 2011; ROMERO-DÍAZ et al., 2007b), estabelecendo volume baseado em suas respectivas equações. Os métodos tradicionais de topografia mensuram volumes de sedimentos acumulado por meio da estimativa de duas superfícies, onde uma determinada superfície efetiva do solo no canal se fundamenta em medições diretas

do depósito de sedimentos e sua área adjacente, confrontada e superfície do solo no canal precedente a construção de diques (ALFONSO-TORREÑO et al., 2019). A inclinação das margens, tal como a superfície do canal livre de depósitos sedimentares são utilizadas como variáveis para interpolação, uma vez que as informações referentes a superfície de retenções antecedentes poucas vezes se encontram disponível, onde o mesmo pode ser empregado na geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT).

A erosão, entendida como um processo de degradação do solo devido à atuação dos fatores naturais e/ou antrópicos, tem cada vez mais merecido a atenção dos pesquisadores, porém, técnicas de topografia necessitam das etapas de campo intensivas, para levantamentos precisos do volume de sedimentos retidos nos diques de restauração (RAMOS-DIEZ et al., 2017). Desta forma, fotogrametria digital, por meio do mapeamento aéreo com Aeronave Remotamente Pilotada-RPA (também conhecida como Veículos Aéreos Não Tripulados-VANTs), ajustada ao GNSS/RTK torna-se uma técnica útil para tais medições, pois caracteriza processos erosivos a partir de imagens ortoretificadas e Modelos Digitais de Elevação (MDE) de alta resolução e precisão gerados por meio de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA), recobrando áreas relativamente grandes e apresentando resultados obtidos de forma mais rápida.

Desta forma, o objetivo do presente artigo é propor uma metodologia para analisar a eficiência e precisão dos levantamentos aéreos realizados por Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) no cálculo de volume de sedimentos acumulados em diques de restauração florestal (obras de hidrologia para restauração depois de incêndios), confrontados aos métodos de levantamento topográfico com Estação Total e GNSS/RTK. A região mediterrânea, no sudeste da Espanha, existe uma quantidade considerável de diques construídos (ALFONSO-TORREÑO et al., 2019), o que torna o estudo de suma importância, com a hipótese de que os produtos gerados pelos levantamentos aéreos com RPAs podem ser uma boa prática em atividades para o cálculo de volume, uma vez que podem ser extraídas elevadas quantidades de dados com precisão e acurácia, tal como otimização temporal para execução dos levantamentos (CUCCHIARO et al., 2019), assim sendo, diminuição de mão de obra e desgaste físico.

2.2. Material e Métodos

2.2.1. Área de Estudo

O estudo foi realizado no sudeste da Espanha, mais especificamente nas montanhas do sul entre os rios Mundo ao norte e o rio Segura ao sul, no recinto provincial de Albacete (Figura 1) inserido na região do incêndio da Sierra Donceles (38°23' N, 1°40' W). Desde registros de incêndios florestais, que começou na Espanha em 1968, um incêndio florestal foi registrado na Sierra Donceles em 1994, causados por raios e afetados 46 ha. Em julho de 2012 o local foi devastado por um incêndio florestal iniciado de forma intencional, que queimou aproximadamente 6500 ha. Em termos geológicos, a área encontra-se nas cadeias montanhosas pré-baéticas com calcário e afloramentos de lomita alternando com intercalações marciais que datam de o quaternário. A altitude varia de 304 a 808 m na Sierra Donceles. De acordo com o Sistema de Taxonomia do Solo (USDA, 1999), solos pertencem à ordem Aridisol, e a subordem Calcid mostra uma argila e textura do solo arenoso (GÓMEZ-SÁNCHEZ et al., 2019).

A área de estudo está sob um clima mediterrâneo semiárido, BSk de acordo com a classificação de Köppen-Geiger (KOTTEK et al., 2006), e a área está localizada no cinturão bioclimático meso-mediterrâneo (RIVAS-MARTÍNEZ et al., 2002). A temperatura média anual e a precipitação média anual são de, respectivamente, 16.6°C e 321 mm, com um máximo de precipitação em outubro (44,5 mm) e outra em maio (39,6 mm) (1990–2014, dados fornecidos pela Agência Meteorológica Espanhola AEMET). O período seco vai de junho a setembro, durante o qual a umidade relativa fica abaixo de 50%. (GONZÁLEZ-ROMERO et al., 2018)

De acordo com o Mapa Espanhol do Solo (2000), os solos das encostas podem ser classificados como Inceptisols e Aridisols, solos erodidos das encostas e depositados nas “Ramblas” ou canais onde as barragens foram construídas foram consideradas entisóis de acordo com a taxonomia do solo do USDA (USDA, 1999). A principal composição da vegetação pré-incêndio na área de estudo consistiu em *Pinus halepensis* Mill., Com arbustos e espécies herbáceas associadas, como *Rosmarinus officinalis* L., *Brachypodium retusum* (Pers.) Beauv., *Cistus clusii* Dunal, *Lavandula latifolia* Medik., *Thymus vulgaris* L., *Helichrysum stoechas* (L.), *Stipa tenacissima* (L.), *T.vulgaris* L., *Quercus coccifera* L., *Plantago albicans* L. Após o incêndio, a recuperação da vegetação foi homogênea em 1YAF e 5YAF, com grande proporção

de espécies pioneiras e de rebrota em encostas e canais de largura. Na cunha de sedimentos das represas construídas, após o 5YAF, foi observada uma proliferação de espécies rudais que a cobriam quase inteiramente (GONZÁLEZ-ROMERO et al., 2018).

Inseridos na região do incêndio da Sierra Donceles de julho de 2012, foram construídos dez (10) Diques (Tabela 1) de contenção de sedimentos, como parte do *Trabajo de Restauracion de Emergência post incêndio de la junta de Comunidades de Castilla-la Mancha*.

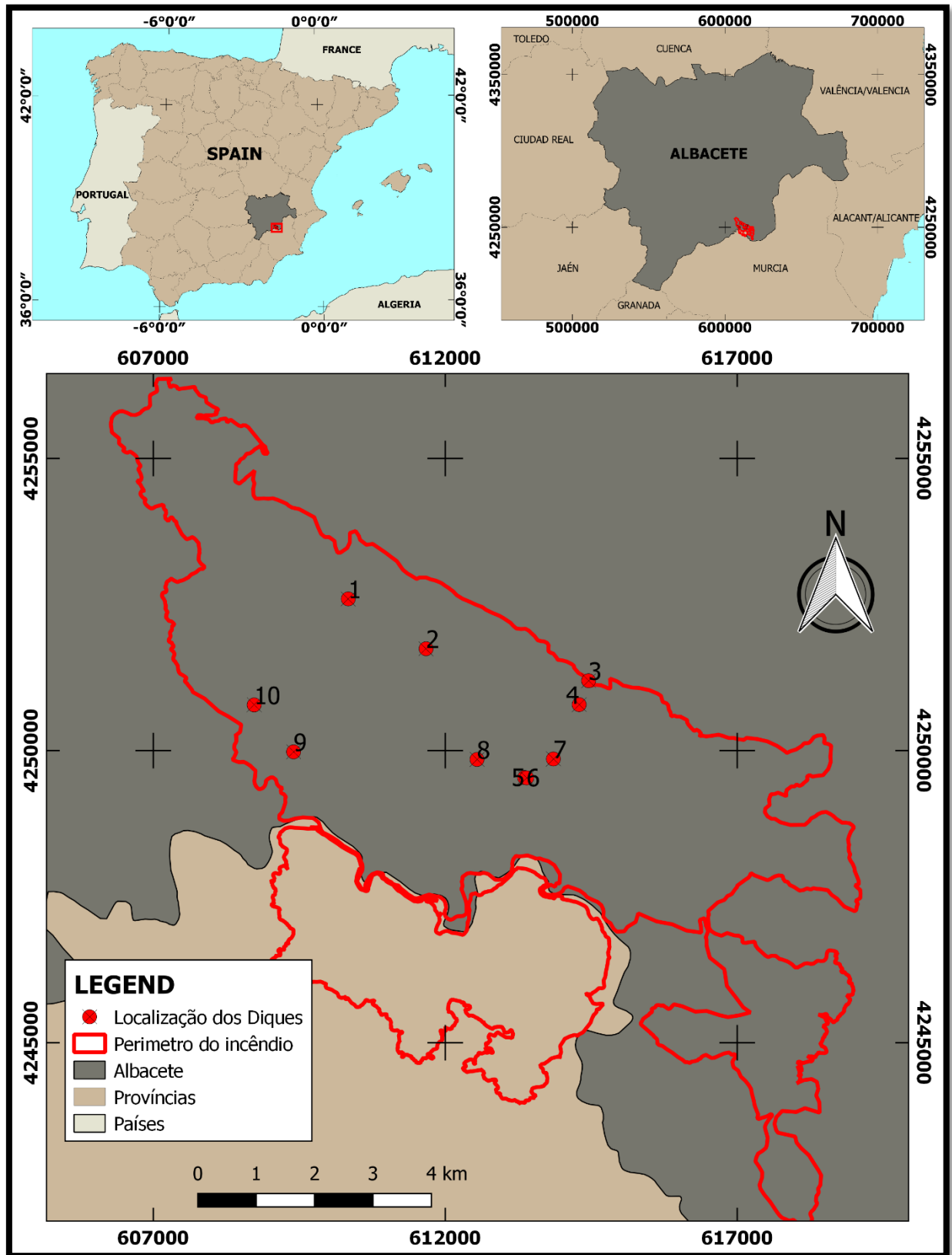
Tabela 1. Diques de contenção de sedimentos do *Trabajo de Restauracion de Emergência post incêndio*

Dique	Nome	Coord X	Coord Y	Datas de construção	Largura (m)	Altura (m)	Material Utilizado
1	Conejo	610337	4252597	16/09/13	38.35	6.25	Concreto
2	Palomar	611670	4251744	30/07/13	38.75	6.40	Concreto
3	Grillo 1	614452	4251197	28/11/13	26.00	6.70	Concreto
4	Grillo 2	614291	4250787	23/10/13	21.00	4.90	Concreto
5	Piñero 1a	613357	4249539	17/07/13	23.00	2.90	Concreto
6	Piñero 1b	613393	4249533	04/07/13	38.00	5.80	Concreto
7	Piñero 3	613850	4249857	12/09/13	26.00	6.38	Concreto
8	Piñero 2	612541	4249848	31/10/13	29.00	4.25	Concreto
9	Rayares 2	609401	4249979	06/11/13	36.00	6.45	Concreto
10	Rayares 1	608726	4250782	16/10/13	28.00	6.22	Concreto

2.2.2. Levantamento topográfico por Aerofotogrametria com RPA

A definição da área do voo foi estabelecida em campo com o auxílio do aplicativo do tipo Ground Station denominado Mission Planner (Figura 2), este sendo um software livre, de código aberto e disponibilizado gratuitamente na internet, onde neste foi possível programar os voos com a RPA, assim, definindo a altura desejada, velocidade de cruzeiro do voo, valores de GSD (Ground Sample Distance), bem como as áreas e a porcentagem de sobreposição frontal (Overlap) e sobreposição lateral (Sidelap) como dispostos na tabela 2.

Figura 1. Mapa de Localização



Considerando o tamanho físico e a distância focal do sensor, a altura máxima do voo foi estipulada em 30 metros, observando também as condições do levantamento e Regulamento de Circulação Aérea do Decreto Real 1036/2017 (ESPANHA, 2017), que define as regras gerais para o uso civil de aeronaves não tripuladas. O teto de voo de 400 pés (120 metros) definido pela regulamentação espanhola não foi alcançado, pois a área recoberta é relativamente pequena e o sensor usado apresenta pequena distância focal. Desta forma, adotou-se a equação proposta por Falkner (1995) para calcular a área de recobrimento de imagens aerofotogramétricas, onde:

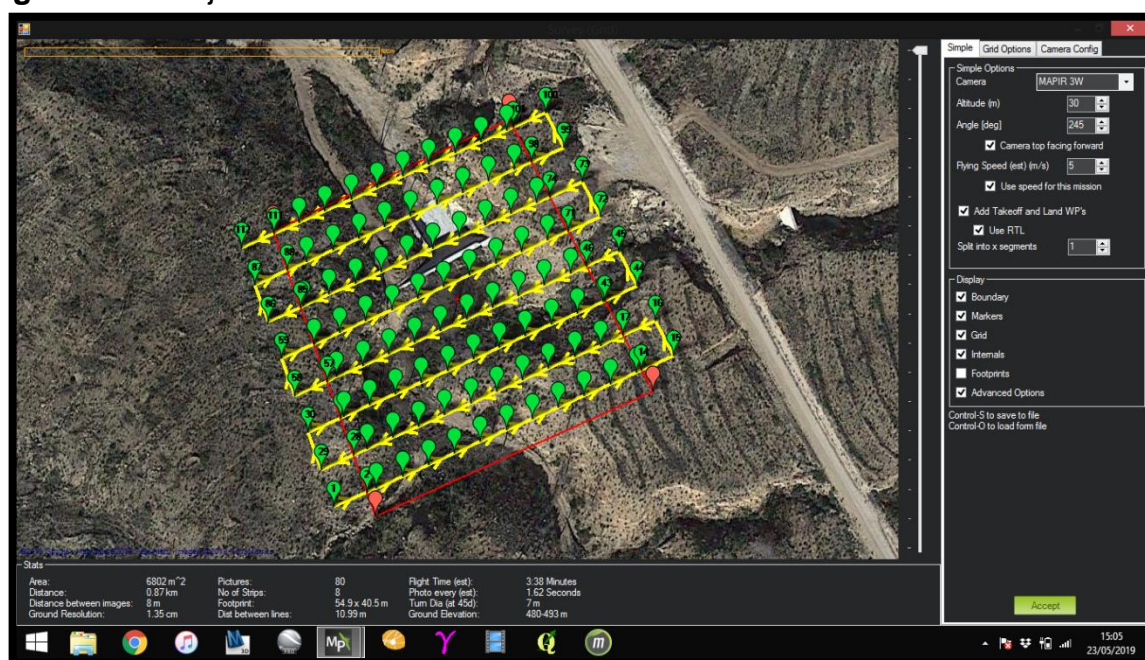
$$Ac = \left(\frac{Av}{Df} \times Ls \right) \times \left(\frac{Av}{Df} \times Cs \right) \quad \text{Eq.01}$$

Onde, Ac é Área coberta, Av se refere à Altura do voo em relação ao solo, Df a Distância focal, Ls é a Largura do sensor, Cs o Comprimento do sensor.

Tabela 2. Dados de configurações dos Planos de Voo.

Dique	Nome	Área (m ²)	GSD (cm)	Imagens/Fotos	Tempo de voo (min)	Sobr. Frontal (%)	Sobr. Lateral (%)	Veloc. do voo (m/s)
1	Conejo	6802	1,35	80	3.38	80	80	5
2	Palomar	8874	1,35	100	4.38	80	80	5
3	Grillo 1	8223	1,35	90	4.05	80	80	5
4	Grillo 2	6047	1,35	67	3.24	80	80	5
5 y 6	Piñero 1 (a y b)	10230	1,35	131	5.23	80	80	5
7	Piñero 3	5059	1,35	56	2.46	80	80	5
8	Piñero 2	5567	1,35	68	3.08	80	80	5
9	Rayares 2	5761	1,35	71	3.28	80	80	5
10	Rayares 1	5321	1,35	63	2.48	80	80	5

Figura 2. Planejamento de voo em Software Mission Planner.



2.2.2.1. Aquisição das imagens

As imagens foram obtidas, em práticas de levantamentos de voos em campo, por meio de uma aeronave remotamente pilotada (RPA) do tipo multirrotor (Quadrirrotor), modelo 3DR Solo (Figura 3) embarcado com uma câmera MAPIR 3 Survey. O sensor acoplado para aquisição das imagens possui resolução de 4000 x 3000, com 12 megapixels e comprimento focal de 4.73 mm. A velocidade para capturar as imagens estipulada em 5 m/s (aproximadamente 18 km/h), podem haver variações dependendo da velocidade e direção do vento. Foi necessário um (1) voo para cada área e seus respectivos diques, totalizando dez (10) voos, cobrindo os objetos de estudo (diques e suas respectivas cunhas de sedimento).

Figura 3. Aeronave Remotamente Pilotada (RPA) do tipo multirrotor (Quadrirrotor), modelo 3DR Solo

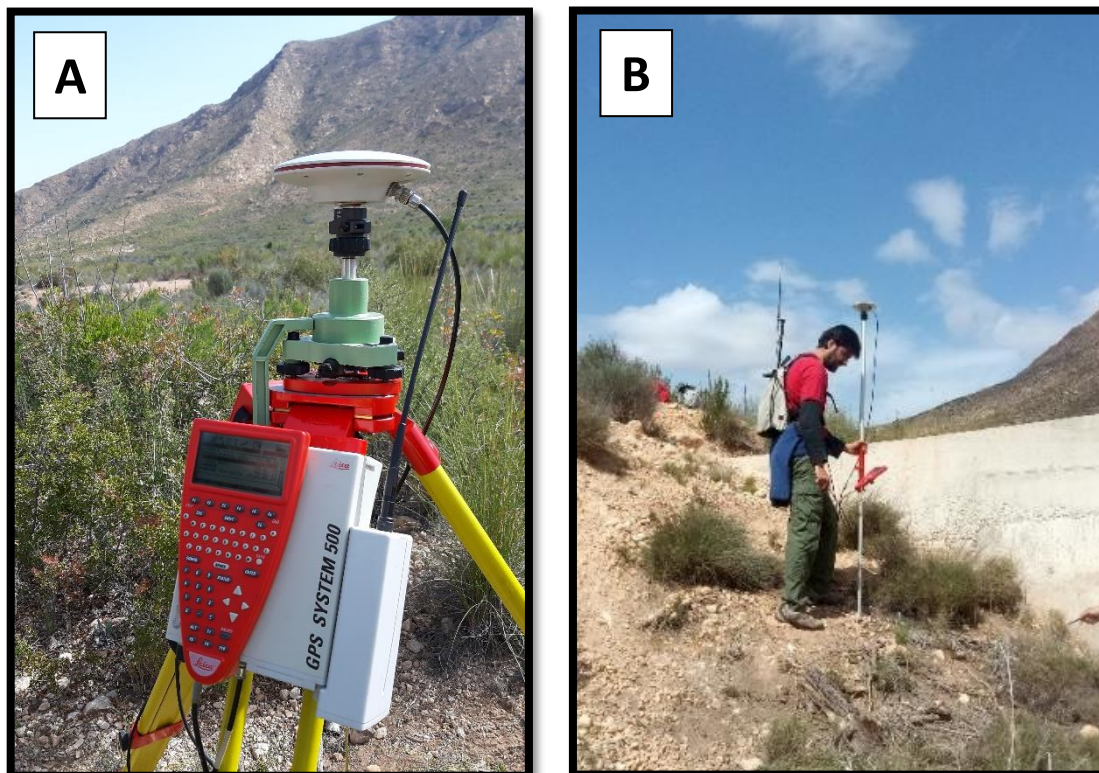


2.2.2.2. Georreferenciamento e Ortomosaico (etapas de produção dos dados)

O levantamento produziu imagens aéreas em formato *JPEG*, incluindo os arquivos acessórios de sincronização de cada cena. As imagens possuem pontos de amarração, no sistema de coordenadas geográficas (latitude/ longitude), que foram convertidas posteriormente para o sistema UTM e Datum ETRS89.

Para o ajustamento e uma melhor precisão e acurácia dos modelos gerados, foram registrados trinta e seis (36) pontos de controle (GCPs – *Ground Control Points*), sendo quatro (4) GCPs para cada área de trabalho contendo os diques e suas respectivas cunhas de sedimentos. Para tanto, utilizando um sistema de GNSS, por meio de um equipamento LEICA GPS1200, com RTK e soluções pós processadas utilizando as constelações GPS e GLONASS (Figura 4). Os pontos de controle (GCPs) foram utilizados posteriormente para georreferenciar os modelos 3D resultantes dos levantamentos executados.

Figura 4. Instalação de pontos de controle por GNSS. (a) Base GNSS (b) GNSS Rover.

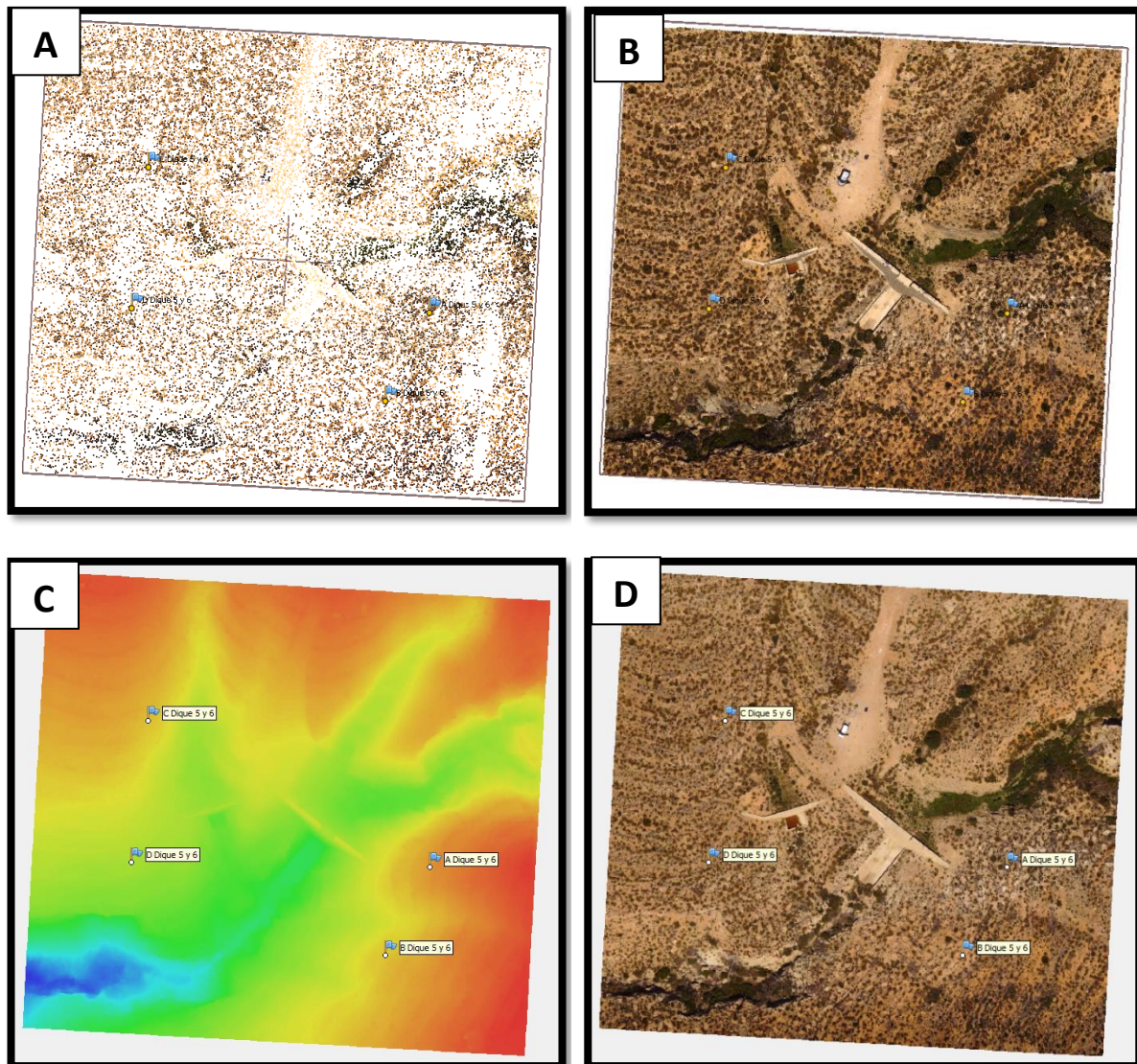


De posse dos dados de campo, utilizou-se o *software* Agisoft Metashape de fotogrametria para realizar o fluxo de trabalho, fazendo-se uso das configurações intermediárias para que os algoritmos de visão computacional do processamento das nuvens esparsa e densa de pontos, não tenham significativa interposição por parte do *software*. O processamento das imagens configurado em níveis intermediários apresenta uma qualidade altimétrica razoável e baixa demanda de tempo no fluxo de trabalho, obtendo uma boa relação temporal entre a aquisição dos dados e o processamento final. No fluxo de trabalho também foi possível gerar e visualizar o ortomosaico, bem como os demais produtos cartográficos necessários para o cálculo de sedimentos.

Na primeira etapa, como fluxo de processamento, as imagens foram posicionadas sistematicamente no plano de trabalho do *software*, de acordo com as coordenadas referentes a cada arquivo JPEG, as quais foram convertidas para o sistema UTM na zona 30N e utilizando o Datum ETRS89, estabelecendo o padrão de sistema de coordenadas para o projeto. Em seguida, foi realizado alinhamento das fotos por meio da detecção, seleção e “matching” dos pontos homólogos das imagens adicionadas, gerando as nuvens espessas de pontos como um pré-processamento (a),

após estabelecidos o nível de qualidade de saída intermediário. Em seguida, após a inserção dos GCPs (pontos de controle) e consequentes ajustamentos das imagens, se obtiveram as nuvens densas de pontos, com excelente precisão e riqueza de detalhes (b). A partir das nuvens densas de pontos foram feitas as classificações das mesmas (classificando como solo, vegetação, construções, pontos fora de análises, entre outros) para que, no momento de construção dos MDEs, fossem possíveis as representações como MDTs e não como MDSs. A etapa final do processamento das imagens consistiu na elaboração do Modelo Digital de Terreno (c), bem como foi construído o Ortomosaico (d) (Figura 5).

Figura 5. Etapas de processamento no Agisoft MetaShape (exemplificado com os diques 5 e 6) (a) Nuvens de pontos esparsa; (b) Nuvem densa de Pontos; (c) Modelo Digital de Elevação (DEM - *Digital Elevation Model*); (d) Ortomosaico.



De posse dos Produtos Cartográficos na forma de MDT, oriundos dos aerolevantamentos de cada dique, foi possível ser feita a extração das informações de 'Volume' da área referente à cunha de sedimentos dos 10 diques, para posterior comparação e análise estatística com os dados 'Volume' procedentes do método por GNSS.

Para tanto os MDTs foram levados a um software de Geoprocessamento (QGIS), no qual foi feita extração dos dados de 'Volume' através da ferramenta 'Raster Volume' da extensão 'Saga GIS', que calcula e extrai a informação de um Raster (MDTs dos voos) e estampa os resultados em um arquivo em formato .TXT.

2.2.3. Levantamento por Estação Total e GNSS/RTK e Estimativa do volume

As pesquisas foram realizadas durante a primavera de 2019, seguindo o método das seções proposto por Díaz, Mongil e Navarro (2014). O equipamento utilizado para as pesquisas foi uma estação total (LEICA TC405) e um dispositivo GNSS de alto desempenho (LEICA GPS1200), ambos com precisão centimétrica, a nuvem de pontos e os dados das seções foram tratados com o software Protopo v6.1.

Esse método foi escolhido devido à sua maior precisão na estimativa do volume por trás das barragens (RAMOS-DIEZ et al. 2017) e possui várias etapas:

I. Para estimar o canal original (CO), duas seções transversais do canal foram pesquisadas. Um imediatamente a jusante da represa e um no final da cunha de sedimentos. O ponto mais baixo de cada seção foi usado para estimar a inclinação do canal original.

II. Seções transversais da cunha de sedimentos (SW) foram pesquisadas com uma distância variável entre elas de 0,5-3m, dependendo do comprimento da cunha, sempre com um ponto no início e na final do SW. Para cada seção, foram extraídos pontos para caracterizar as encostas adjacentes. Além disso, também foram pesquisadas as áreas do SW, consideradas importantes como elevações ou depressões com mudanças acentuadas de z e que não se enquadravam em nenhuma seção.

III. Estimar a área de cada seção transversal (m²). Cada seção veio como a área contida entre os perfis transversais do SW e do OC naquele ponto (Figura 6). Para ajustar o perfil do OC de cada seção, o ponto central da largura

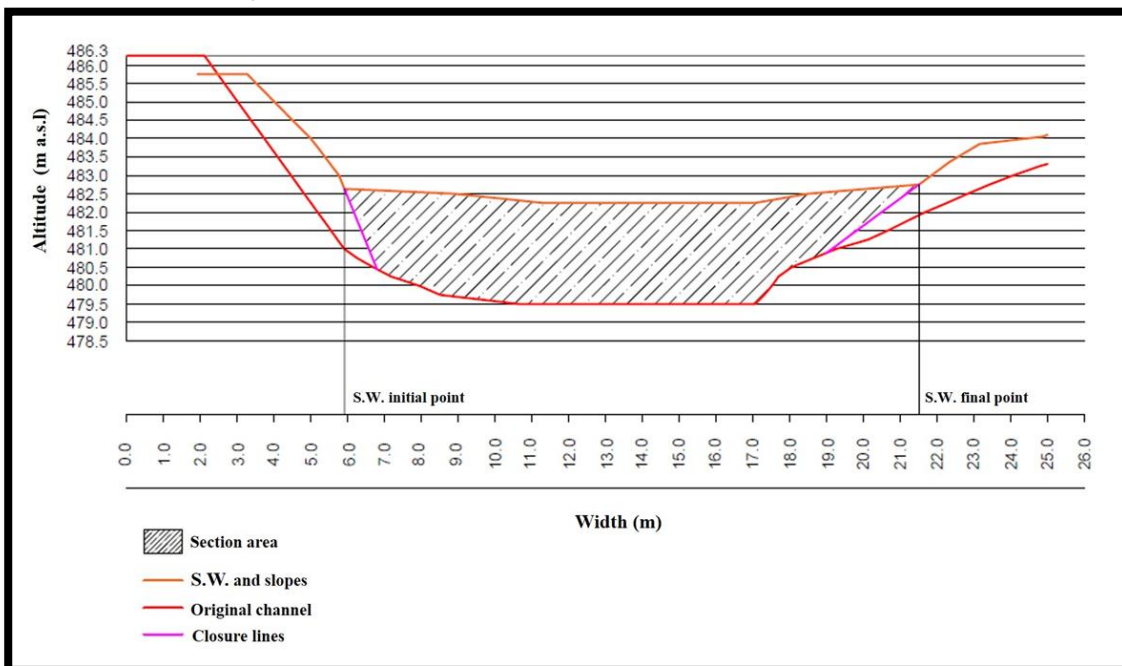
dos perfis foi tomado como referência e a altitude do perfil do OC foi ajustada com base na inclinação do canal. Se os dois perfis não se cruzavam, as linhas de fechamento que seguem a inclinação das encostas adjacentes do SW eram usadas para fechar o polígono, como pode ser observado na Figura 6. Nossa hipótese foi de que o canal nas seções mais próximas à barragem de checagem estivesse mais próximo da seção a jusante, enquanto para aqueles mais próximos do final da cunha, o canal era como a seção a montante.

IV. O volume entre as duas seções seguintes foi estimado usando a Equação 02, usado para calcular o volume de um prismaide. O volume final foi calculado como a soma de todos os volumes entre as seções.

$$V_s = \frac{d}{6} \times (S_1 + S_2 + 4 \times S_{av}) \quad \text{Eq.02}$$

Onde: V_s é o volume entre as seções; d é a distância entre as seções; S_1 e S_2 são as áreas de cada seção; S_{av} é a área média entre as seções.

Figura 6. Exemplo de seção transversal com ajustes. A linha laranja representa o perfil SW, o vermelho o perfil OC e o rosa fecham o polígono após as encostas do SW. A área da seção é representada com linhas pretas tracejadas.



2.2.4. Análises Estatísticas

Foi explorado as relações entre as variáveis 'volume de sedimentos' e/ou taxas de deposição, extraídos em métodos topográficos por 'Aerofotogrametria com RPA' e por 'Estação Total e GNSS', para serem levados a diante todos os processos de análises estatísticas necessárias para o desenvolvimento da pesquisa. Para tanto foram empregados os métodos estatísticos ANOVA simples, ANOVA Multifatorial, Correlação e Regressão Simples.

III. ANOVA Simples

Este procedimento executa uma análise de variância de um fator, neste caso para a variável 'Volume' dos diques (expresso em m³). Constrói vários testes e gráficos para comparar os valores médios da variável estudada (volume dos diques) para os 2 níveis diferentes de 'métodos' aplicados (Volume por RPA e por GNSS).

Neste sentido, o teste 'F' na tabela ANOVA determina se há diferenças significativas entre as médias. Se há diferença, os testes de intervalo múltiplo informam quais meios são significativamente diferentes dos outros. Quando há a diferença significativa e, caso da não confiabilidade dos dados (por discrepâncias dos valores das médias pela tabela ANOVA), pode ser usado para análise o teste de Kruskal-Wallis, que compara as medianas em vez das médias.

Os diferentes gráficos deste método estatístico ajudam a julgar o significado prático dos resultados, bem como na procura de possíveis violações das hipóteses subjacentes na análise de variância.

IV. ANOVA Multifatorial (método e tamanho)

Este procedimento realiza uma análise de variância de vários fatores para a variável 'Volume'. Executa vários testes e gráficos para determinar quais fatores têm um efeito estatisticamente significativo para esta variável.

Este método também avalia a significância das interações entre os fatores, se houver dados suficientes. Os testes 'F' na tabela ANOVA permitem identificar fatores significativos. Para cada fator significativo, os testes de intervalo múltiplo informam quais médias são significativamente diferentes das outras. O Gráfico de Estoque e o Gráfico de Interação ajudam a interpretar os efeitos significativos referentes às múltiplas variáveis analisadas.

Os gráficos de resíduos ajudam a julgar se os dados violam as hipóteses subjacentes à análise de variância.

V. Correlação

Este procedimento foi desenvolvido para resumir várias colunas de dados quantitativos. Ele calcula várias estatísticas, incluindo correlações, covariâncias e correlações parciais. Uma série de gráficos multivariados também é incluída no procedimento, fornecendo visualizações importantes dos dados.

VI. Regressão Simples

Como produto de uma Regressão Simples se mostra os resultados do ajuste de um modelo linear para descrever a relação entre as Variáveis Dependentes e as Variáveis Independentes. A equação do modelo ajustado é apresentada por:

$$Y = a + b \times X \quad \text{Eq.03}$$

Onde:

Y representa os valores da Variável Dependente;

X representa os valores da Variável Independente.

2.3. Resultados

Foram obtidas as nuvens de pontos com densidades volumétricas levantadas em campo com GNSS/RTK e o RPA, das quais foram elaborados os respectivos MDTs a partir de uma estrutura de malha triangular irregular (TIN), utilizando os próprios pontos amostrados para representar a superfície por meio de uma estrutura formada por triângulos interligados, de forma a representar melhor a superfície não homogênea com variações locais acentuadas da pilha de sedimentos.

2.3.1 Topografia por Estação Total e GNSS/RTK

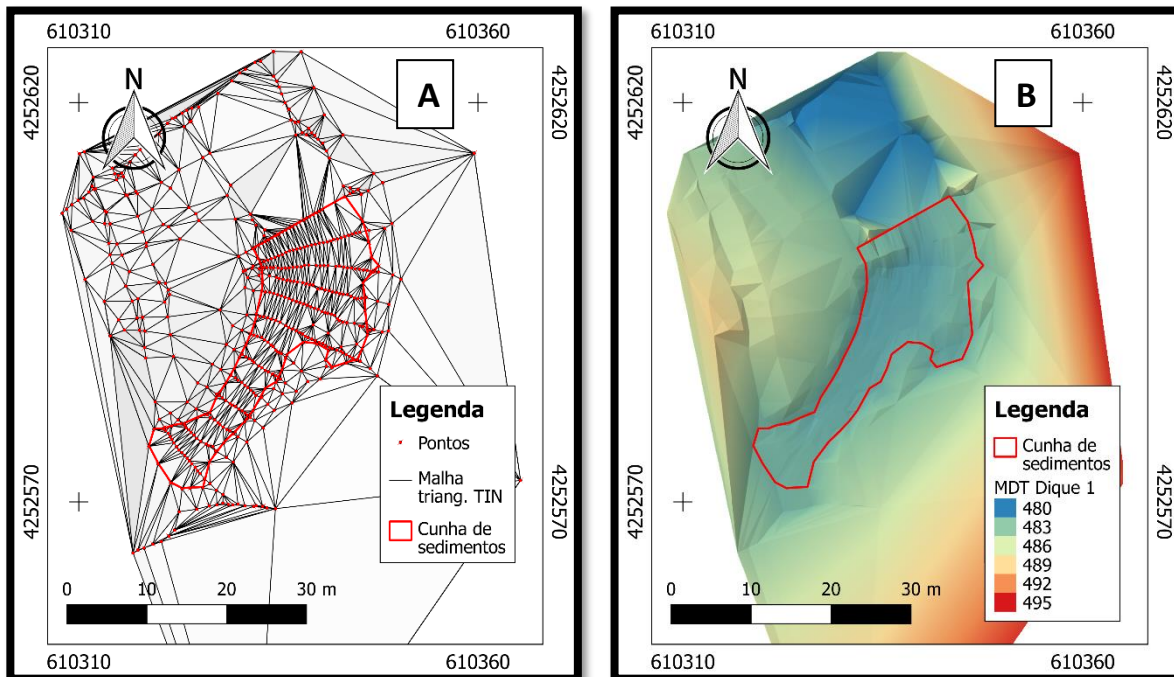
Foram obtidos resultados planialtimétricos para os 10 diques estudados, dispostos na Tabela 3, constando os dados e valores de Tempo de levantamento de campo, Tempo de Processamento, Nuvens de Pontos, Tamanho da área levantada, RMSE (*Root-Mean-Square Error*, expressa a acurácia dos resultados) e Densidade das Nuvens de Pontos.

Tabela 3. Resultados dos levantamentos por GNSS/RTK.

Dique	Nome	Tempo de Levantamento em campo	Tempo de Processamento	Nuvem de Pontos	Área (ha)	RMSE (m)	Point Density (p/m ²)
1	Conejo	≈1h 30 min	≈25 min	549	0.268	<0.04	0.204
2	Palomar	≈1h 30 min	≈25 min	400	0.324	<0.04	0.123
3	Grillo 1	≈1h 30 min	≈25 min	291	0.112	<0.04	0.260
4	Grillo 2	≈1h 30 min	≈25 min	296	0.129	<0.04	0.228
5 y 6	Piñero 1 (a y b)	≈3h 00 min	≈50 min	593	0.326	<0.04	0.182
7	Piñero 3	≈1h 30 min	≈25 min	297	0.136	<0.04	0.218
8	Piñero 2	≈1h 30 min	≈25 min	365	0.207	<0.04	0.176
9	Rayares 2	≈1h 30 min	≈25 min	257	0.170	<0.04	0.151
10	Rayares 1	≈1h 30 min	≈25 min	423	0.210	<0.04	0.201
MÉDIA	-	-	-	-	-	<0.04	0.194
TOTAL	-	≈15h 00 min	≈4h 10 min	3471	1.882	-	-

Desta forma, foram realizados para cada um dos dez (10) Diques as planificações dos Pontos e Malhas triangulares TIN (A) e levantamentos topográficos planialtimétricos (hipsometria) dos Diques, onde podem ser observados na Figura 7 (aqui representados pelo Dique 1)

Figura 7. Pontos e Malha triangular TIN (A) e levantamento topográfico planialtimétrico (MDT) dos Diques.



2.3.2 Topografia por Aerofotogrametria com RPA

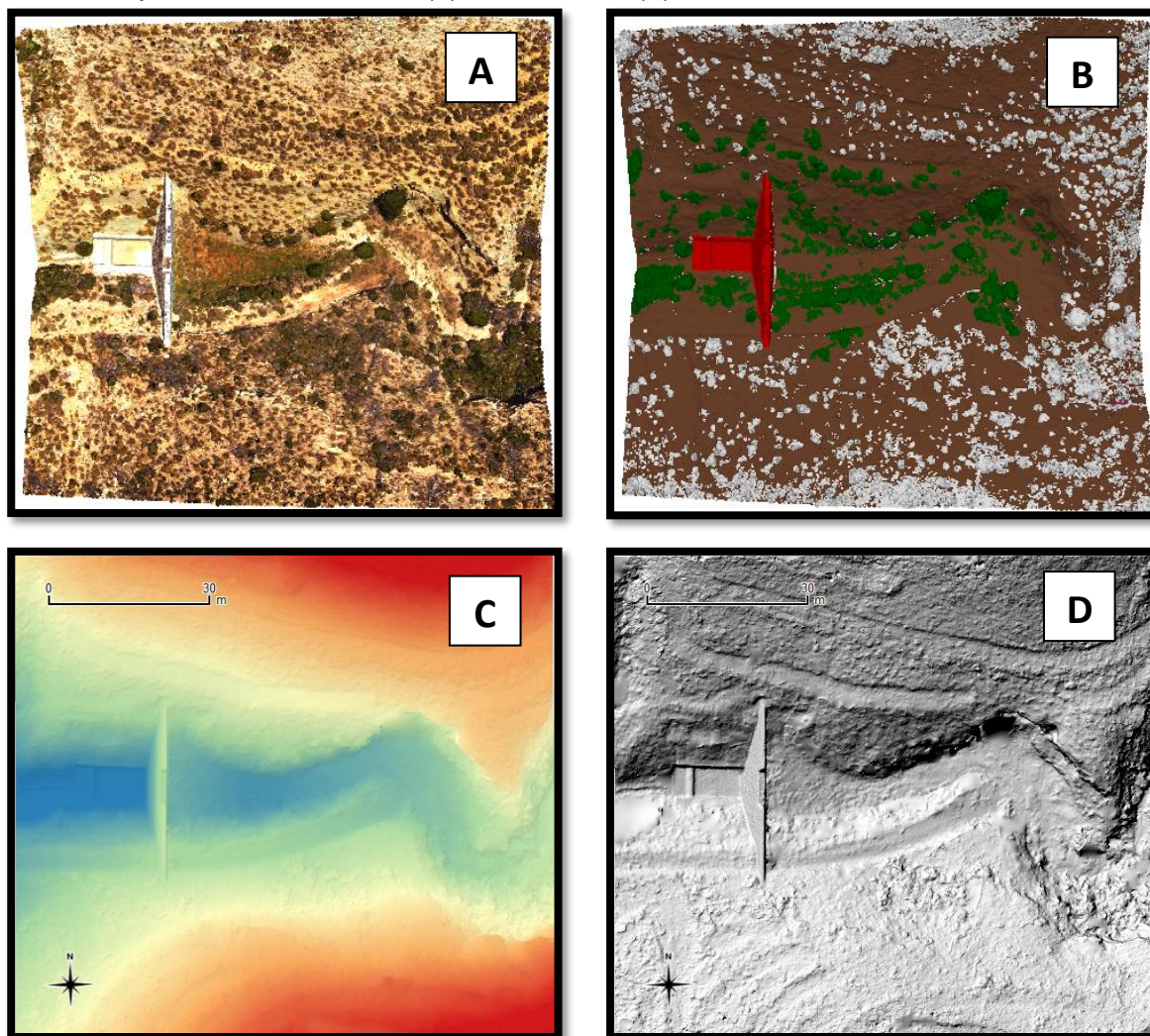
Foram obtidos resultados fotogramétricos para cada levantamento de seus respectivos diques, dispostos na Tabela 4, constando os dados e valores de Nuvens de Pontos, Tempo de Processamento, GSD, Resolução do MDT e Densidade das Nuvens de Pontos.

Tabela 4. Resultados dos levantamentos aerofotogramétricos por RPA.

Dique	Nome	Tempo de Processam.	Nuvem de Pontos	Área (ha)	GSD (cm)	RMSE (m)	Resolução MDT (cm)	Point Density (p/m ²)
1	Conejo	27min 39sec	9.957.856	1.51	1.21	0.369	4.82	429.73
2	Palomar	28min 55sec	8.718.922	1.74	1.36	0.424	5.42	339.83
3	Grillo 1	13min 27sec	5.544.786	1.16	1.37	0.503	5.50	330.64
4	Grillo 2	11min 50sec	3.109.516	1.04	1.85	0.573	7.40	182.83
5 y 6	Piñero 1 (a y b)	16min 16sec	6.743.476	1.75	1.49	0.399	5.98	280.09
7	Piñero 3	08min 22sec	2.817.697	0.63	1.46	0.421	5.84	293.18
8	Piñero 2	08min 12sec	4.668.160	0.91	1.31	0.417	5.23	364.99
9	Rayares 2	07min 33sec	5.768.404	0.89	1.24	0.362	4.94	409.51
10	Rayares 1	08min 13sec	4.047.376	0.85	1.40	0.419	5.59	320.56
MÉDIA	-	-	-	-	1.27	0.432	5.63	327.93
TOTAL	-	2h 10min 27sec	51.376.193	10.48	-	-	-	-

Para tanto foram gerados para cada um dos dez (10) Diques, e podem ser observados na Figura 8, os seguintes produtos cartográficos: (a) Nuvem de pontos 3D, (b) Nuvem de pontos classificada, (c) DEM MDT, (d) DEM Relevo sombreado.

Figura 8. Detalhe dos produtos cartográficos obtidos: (a) Nuvem de pontos 3D, (b) Nuvem de pontos classificada, (c) DEM MDT, (d) DEM Relevo sombreado.



2.3.3. Análise comparativa entre topografia por Aerofotogrametria com RPA e Estação Total e GNSS/RTK

O levantamento topográfico por meio de Estação total/GNSS, foi utilizado como dados de referência para efeito de comparação com os valores do levantamento utilizando RPA nos dez (10) diques. Em seguida, foram extraídos os dados de volumes

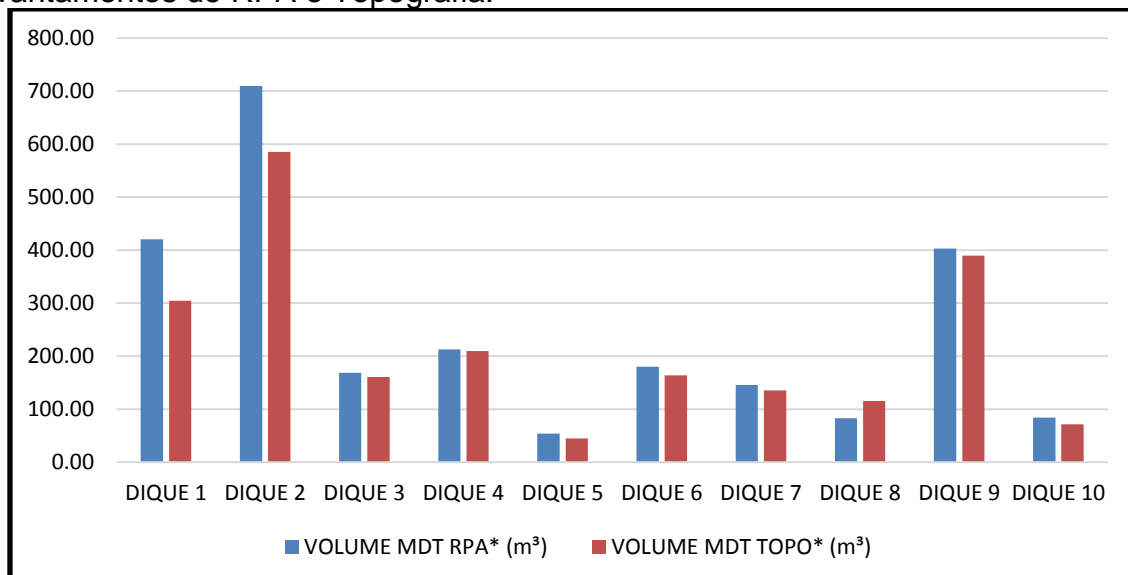
das cunhas de sedimentos dos referidos diques com os dois métodos de topografia (GNSS e RPA) e dispostos na Tabela 5 para comparação.

Assim como podem ser observados na Figura 9, os dados comparativos dos volumes obtidos em cada dique para os dois métodos de levantamento (topografia por Aerofotogrametria com RPA e Estação Total e GNSS/RTK).

Tabela 5. Valores dos sedimentos calculados por topografia com RPA e GNSS/RTK

	Volume por RPA (m ³)	Volume por GNSS/RTK (m ³)
Dique 1	420,69	304,53
Dique 2	709,72	585,70
Dique 3	168,42	160,48
Dique 4	212,70	209,54
Dique 5	53,60	45,02
Dique 6	180,15	163,58
Dique 7	145,78	135,45
Dique 8	82,72	115,58
Dique 9	402,99	389,52
Dique 10	83,94	71,32

Figura 9. Gráfico de comparação dos dados de volume de sedimentos extraídos dos levantamentos de RPA e Topografia.



De posse dos dados de volume de sedimentos extraídos dos levantamentos de RPA e GNSS foi possível ser aplicados métodos de análises estatísticas de forma a extrair dados para melhor entendimento e discussão dos mesmos.

2.3.3.1. Análise estatística ANOVA

Como pode ser observado no método estatístico ANOVA (Tabela 6), a variação do 'Volume' foi dividida em dois componentes: um componente entre grupos e um outro componente incluso nos grupos.

A razão F, que neste caso é igual a 0,112198, resulta da estimativa entre grupos e a estimativa inserida nos grupos. Como o valor P referente a razão F é maior ou igual a 0,05, não há diferença estatisticamente significativa entre os dados de Volume médios (em m³) dos métodos de trabalho (RPA e GNSS), com um nível de confiança de 95,0%.

Tabela 6. ANOVA para Volume por Método de levantamento

Fonte	Soma de Quadrados	GI	Quadrado Médio	Razão-F	Valor-P
Entre grupos	3919.72	1	3919.72	0.11	0.7415
Intra grupos	628841.	18	34935.6		
Total (Corr.)	632761.	19			

2.3.3.1.1 Testes de Múltiplas Classes para Volume por Métodos de levantamento

Aplicando um procedimento de comparação múltipla para determinar quais médias são significativamente diferentes das outras, foi observado diferença estimada de 27.9m³ entre as médias de 'volume' por RPA e GNSS, onde a mesma não representa diferença estatisticamente significante, com um nível de confiança de 95,0%.

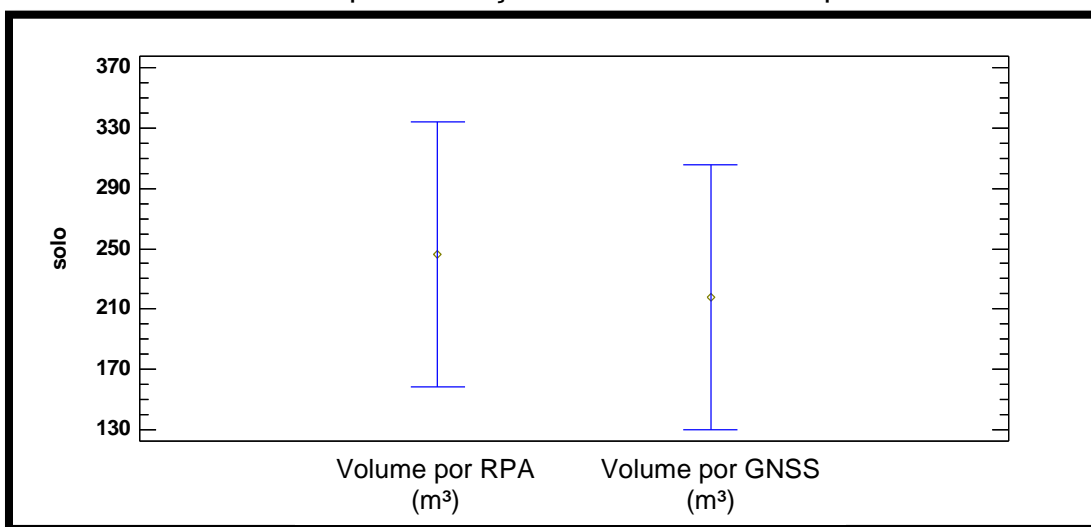
No procedimento de diferença mínima significativa (*Least Significant Difference* - LSD) de Fisher usado para discriminação entre as médias dos diferentes métodos (discriminação entre as médias de volume por RPA e volume por GNSS) foi identificado resultados de um (1) grupo homogêneo (Tabela 7), de acordo com o alinhamento dos "Xs" na coluna. Não há diferenças estatisticamente significativas entre os níveis que compartilham a mesma coluna do X, como podem ser observadas

também no gráfico comparativo de diferenças estatisticamente significativas (Figura 10).

Tabela 7. Identificação de grupos Homogêneos (95.0 porcentagem por LSD)

Método	Casos	Média	Grupos Homogêneos
Volume por GNSS (m ³)	10	218.072	X
Volume por RPA (m ³)	10	246.071	X

Figura 10. Gráfico comparativo de diferenças estatisticamente significativas entre os métodos de levantamentos para extração/cálculo de Volume por RPA e GNSS.



2.3.3.1.2 Teste de Kruskal-Wallis para Volume por Métodos

Os métodos de levantamento aplicados com o RPA e o GNSS também não demonstraram diferença estatística significativa ($P > 0.05$) para o método estático Kruskal-Wallis, com confiança de 95,0% (Tabela 8), assim, não havendo diferença entre os métodos de levantamento topográfico utilizados.

Tabela 8. Teste de Kruskal-Wallis para Volume por Métodos

Método	Tamanho Amostra	Intervalo Médio
Volume por RPA (m ³)	10	11.1
Volume por GNSS (m ³)	10	9.9

Estatístico = 0.205714 Valor-P = 0.650147

2.3.3.2. ANOVA Multifatorial para Método e Tamanho

Pode ser observado na Tabela 9 a aplicação do modelo estatístico ANOVA Multifatorial por Método e Tamanho, onde para a variável 'Tamanho' (subdividida em duas classes: 'P' para volumes de diques pequenos e 'G' para volumes de diques grandes), os Erros Padrão se diferenciam consideravelmente.

Foi apresentando um Erro Padrão para 'P' de 64.0426 e para 'G' de 41.9257. Isso indica que, para os métodos que foram analisados, quanto maior o tamanho do objeto estudado (Volume) menor será a probabilidade de erro. Logo quanto menor o tamanho da variável 'Volume' menos confiável são os resultados em relação aos dados com Volumes maiores. Consequentemente, o Erro Padrão se torna um fator inversamente proporcional à variável Volume.

Tabela 9. Tabela de Médias e Erro Padrão da variável 'volume' para os fatores Método e Tamanho, com intervalos de confiança de 95.0%

Nível	Casos	Média	Erro Padrão	Limite Inferior	Limite Superior
Média Global	20	187.298			
MÉTODO	-	-	-	-	-
Volume por RPA (m ³)	10	201.297	51.9157	91.7644	310.83
Volume por GNSS (m ³)	10	173.298	51.9157	63.7654	282.831
TAMANO					
G	14	299.232	41.9257	210.776	387.688
P	6	75.3633	64.0426	-59.7551	210.482

2.3.3.3. Análise de correlação

Como produto, podemos observar na tabela 10 o resumo estatístico para cada método de levantamento utilizado (RPA e GNSS). Inclui medidas de tendência central, de variabilidade e de forma. De particular interesse devem ser observados o viés padronizado e a curtose padronizada, de forma que determinam se a amostra tem origem de uma distribuição normal.

Os valores dessas estatísticas dentro do intervalo de -2 a +2 não indicam desvios significativos da normalidade. Nesse caso, nenhuma das variáveis mostram valores de viés e curtose padronizados fora do intervalo esperado. Desta forma, validando os procedimentos estatísticos aplicados a esses dados.

Tabela 10. Resumo Estatístico

	Volume por RPA (m ³)	Volume por GNSS (m ³)
Contagem	10	10
Média	246.071	218.072
Desvio padrão	205.926	165.728
Coeficiente de variação	83.6854%	75.9971%
Mínimo	53.6	45.02
Máximo	709.72	585.7
Intervalo de classes	656.12	540.68
Viés Padronizado	1.87486	1.77395
Curtose padronizada	1.16967	1.06909

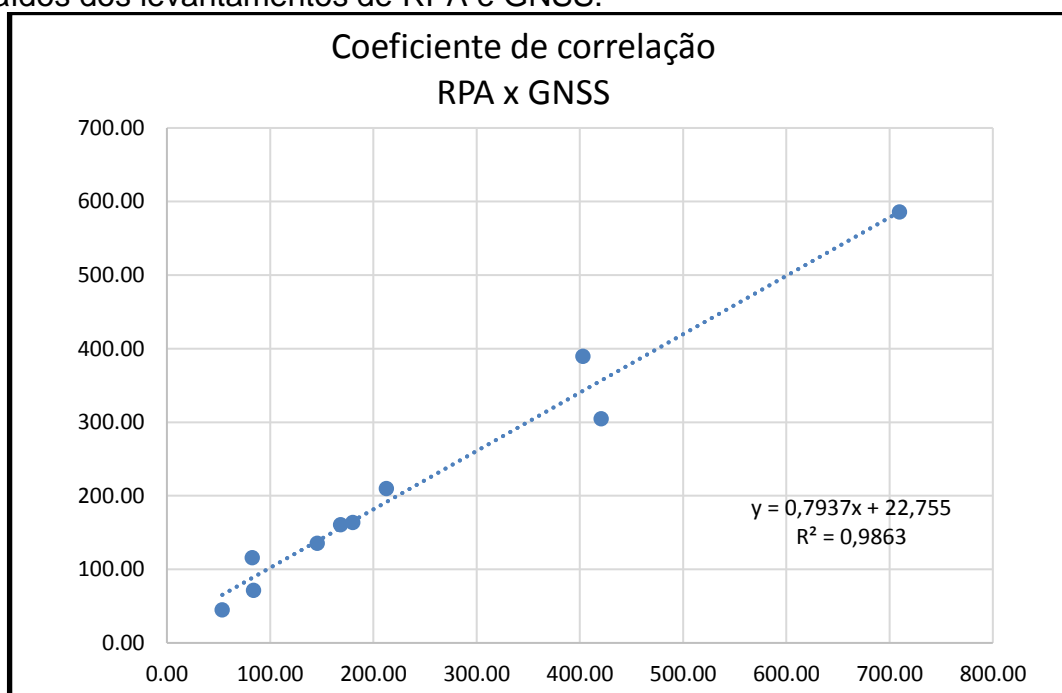
Para o Coeficiente de Correlação, foi observado correlação positiva entre os métodos de levantamento topográfico utilizados, com R^2 na ordem de 0,986, onde os dados podem ser observados na tabela 11, bem como expostos no gráfico de correlação entre os dados de volume dos sedimentos na figura 11.

O valor P, apresenta valores abaixo de 0,05 para as variáveis 'Volume por RPA' e 'Volume por GNSS', indicando correlações significativamente diferentes de zero, com nível de confiança de 95,0%.

Tabela 11. Coeficiente de Correlação para volume por GNSS e RPA

Volume por GNSS (m ³)	Volume por RPA (m ³)
Correlação	0.9863
(Tamanho de Amostra)	(10)
Valor-P	0.0000

Figura 11. Coeficiente de correlação entre os dados de volume de sedimentos extraídos dos levantamentos de RPA e GNSS.



2.3.3.4. Regressão simples - 'Volume por RPA' vs. 'Volume por GNSS'

Como produto de uma Regressão Simples se mostram os resultados (tabelas 12 e 13) do ajuste de um modelo linear para descrever a relação entre a variável dependente 'Volume por RPA' e a variável independente 'Volume por GNSS'. A equação do modelo ajustado é apresentada por:

$$\text{'Volume por RPA'} = -21.171 + 1.22548 * \text{'Volume por GNSS'}$$

Tabela 12. Resultados de Coeficientes por Regressão Simples

Parâmetro	Quadrados Mínimos Estimados	Erro Padrão	Estatístico T	Valor-P
Intercepto	-21.171	19.511	-1.08508	0.3095
Pendente	1.22548	0.0725749	16.8857	0.0000

Tabela 13. Resultados de Análises de Variância por Regressão Simples

Fonte	Soma de Quadrados	Gl	Quadrado Médio	Razão-F	Valor-P
Modelo	371232.	1	371232.	285.13	0.0000
Resíduo	10415.9	8	1301.99		
Total (Corr.)	381648.	9			

Coefficiente de Correlação = 0.98626

R-quadrada = 97.2708 por cento

R-quadrado (ajustado para g.l.) = 96.9296 por cento

Error padrão est. = 36.0831

Error absoluto médio = 24.1849

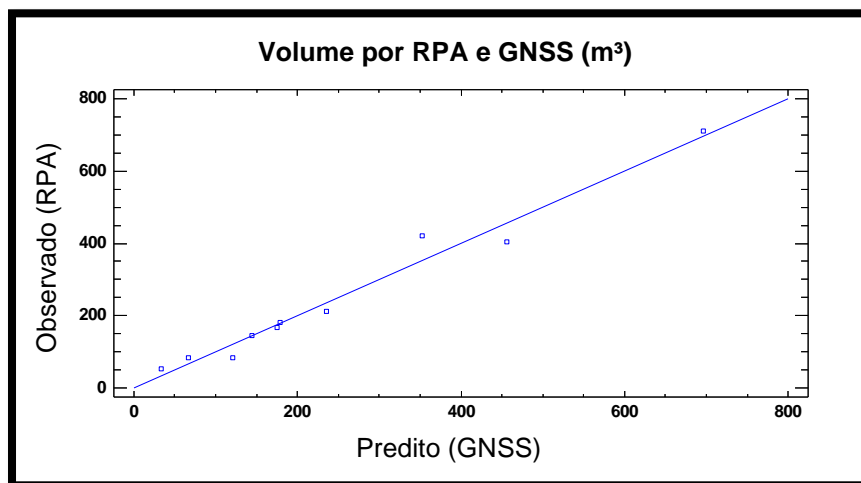
Estadístico Durbin-Watson = 1.21596 (P=0.0733)

Auto correlação de resíduos em atraso 1 = 0.150622

Como o valor P na tabela ANOVA é menor que 0,05, existe uma relação estatisticamente significativa entre 'Volume por RPA*(m³)' e 'Volume por GNSS*(m³)' com um nível de confiança de 95,0%.

A estatística R-Quadrada indica que o modelo ajustado explica 97,2708% da variabilidade no 'Volume por RPA*(m³)'. O coeficiente de correlação é igual a 0,9863, indicando uma relação relativamente forte entre as variáveis (Figura 12). O erro padrão da estimativa indica que o desvio padrão dos resíduos é 36,0831.

Figura 12. Coeficiente de correlação entre os dados de volume de sedimentos extraídos dos levantamentos de RPA e GNSS.



O Erro Médio absoluto (MAE) de 24.1849 é o valor médio dos resíduos. O método estatístico Durbin-Watson (DW) examina os resíduos para determinar se há alguma correlação significativa com base na ordem em que eles são apresentados no

arquivo de dados. Como o valor P é maior que 0,05, não há indicação de autocorrelação serial nos resíduos com nível de confiança de 95,0%.

2.3.3.5. Análise de densidade e pontos

Neste contexto, a varredura com o RPA, dentre as duas (2) plataformas utilizadas, foi a que gerou a nuvem de pontos mais densa, com mais de 51 milhões de pontos (51.376.193 pontos) se somado os valores dos 10 diques estudados, equivalendo a uma densidade média da nuvem de pontos de 327,93 pontos/m²/m³, dando origem aos MDTs.

Com relação ao levantamento com GNSS RTK, por se tratar de um levantamento direto (ponto por ponto), os resultados alcançados são mais modestos, quando comparados com os levantamentos aéreos por RPA, apresentando nuvem de pontos na ordem de 3471 pontos cotados (total dos 10 diques), o que equivale a uma densidade média de apenas 0,194 pontos/m²/m³ (Tabela 14).

Tabela 14. Nuvem de pontos e Densidade média da nuvem de pontos (pontos/m²/m³) para RPA e GNSS.

-	RPA	GNSS/RTK
Nuvem de Pontos	51.376.193	3471
Densidade média da nuvem de pontos (pontos/m ² /m ³)	327,93	0,194

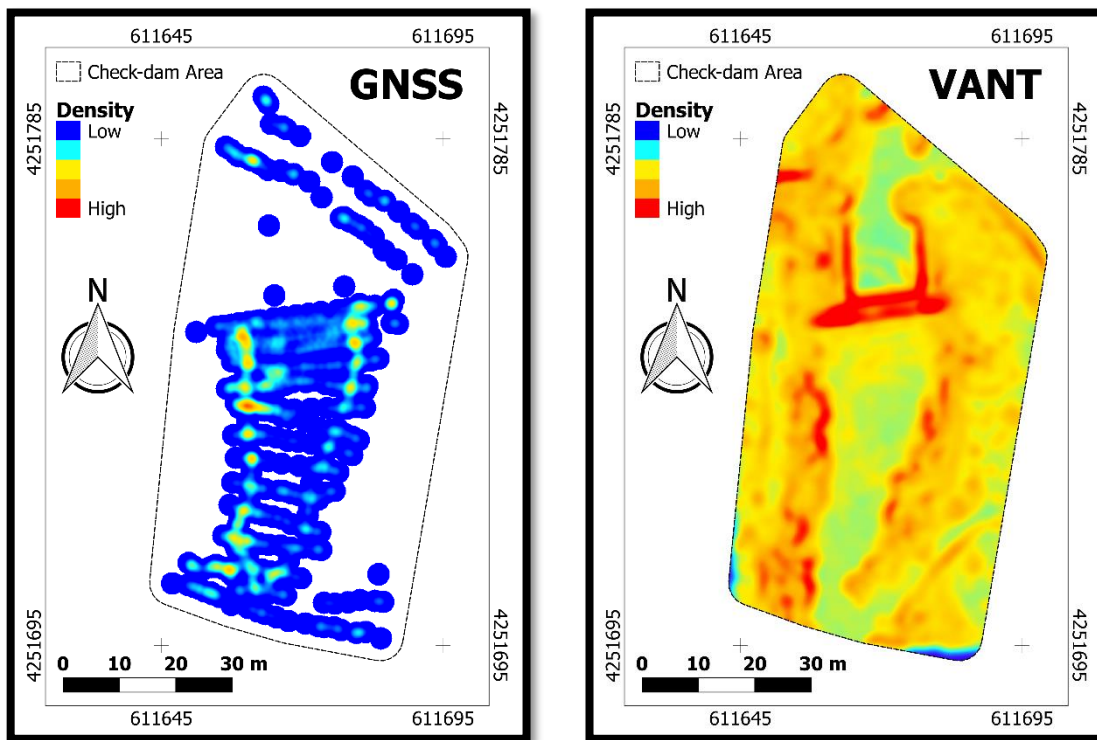
Para gerar um MDT que represente de maneira coesa a superfície dos sedimentos, as nuvens de pontos obtidas nas duas (2) plataformas de levantamento, devem ser representativas quanto sua quantidade e posicionamento dos pontos cotados em relação às oscilações da superfície irregular dos sedimentos acumulados nos diques, sem que ocorra escassez de informação.

Avaliando espacialmente a densidade das nuvens de pontos dentro das áreas de estudo, é possível observar que o recobrimento com o GNSS RTK apresenta pontos cotados bem distribuídos por todas as áreas das cunhas de sedimentos, bem como de arredores próximos e perfis à montante e jusante dos diques. Ainda assim apresenta densidade máxima de pontos com apenas 0.194 pontos/m², com

informação concentrada apenas sobre a intersecção dos pontos que delimitam a cunha de sedimentos e as linhas de caminhamento dos perfis, construídos para definição de relevo e taludes dos respectivos diques.

Quanto ao levantamento utilizando RPA, as nuvens de pontos recobriram toda a área de estudo para cada dique, incluindo arredores, apresentando pouca variação de densidade em relação à localização, sendo os alvos com áreas de superfícies menos rugosas (independente de declividade e suas inclinações angulares) com maior porção de densidade na nuvem de pontos, chegando a 429.73 pontos/m² (Figura 13).

Figura 13. Densidade das nuvens de pontos obtidas pelos métodos RPA e GNSS. Construídas para todos os 10 diques e aqui representadas pelo dique 2.



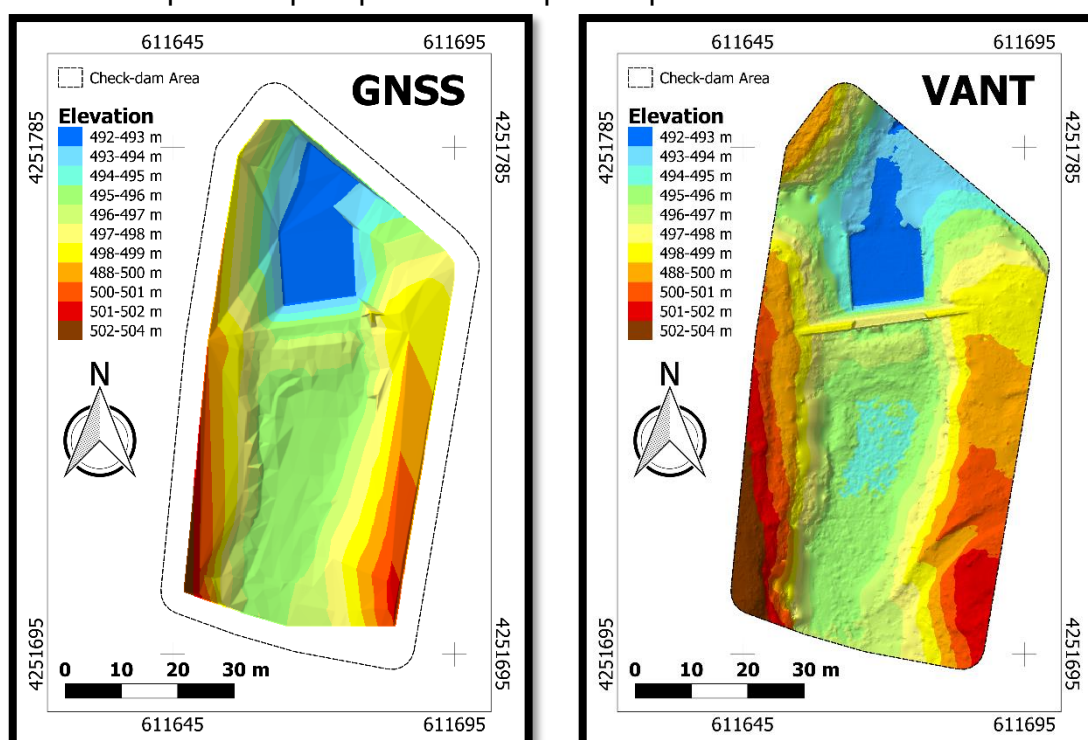
A distribuição da nuvem de pontos caracteriza a capacidade do MDT em representar a superfície das áreas dos diques bem como suas cunhas de sedimentos, observado na Figura 14.

É possível observar nos MDTs (obtidos pela malha TIN - Triangular Irregular Network) que os modelos gerados a partir das nuvens de pontos do RPA obtiveram

melhor representação geométrica dos diques e seus entornos, detectando os detalhes das superfícies irregulares da área de estudo.

Os MDTs gerados a partir dos pontos do GNSS/RTK delinham de forma mais espaçada os dados de representação da superfície, ao passo que nas áreas com ausência de informação há uma simplificação, de forma geral, das geometrias dos modelos topográficos representantes das áreas estudadas.

Figura 14. MDTs gerados pelo método Triangular Irregular Network. Construídos para todos os 10 diques e aqui representados pelo dique 2.



2.4. Discussão

No presente trabalho foi apresentado dois (2) métodos para estimar acúmulo de sedimentos em diques de restauração florestal, por meio de técnicas de fotogrametria fazendo uso de aeronave remotamente pilotada (RPA) e técnicas de topografia por GNSS RTK. Os levantamentos aerofotogramétricos apresentaram acurácia muito próximas aos métodos topográficos mais precisos propostos na literatura atual para modelagem topográfica de depósitos de sedimentos em diques de restauração (ALFONSO-TORREÑO et al., 2019; TLS: RAMOS-DIEZ et al., 2017 e

SOUGNEZ et al., 2011). Desta forma, não apresentaram diferença estatisticamente significativa entre os métodos, pertencentes a apenas um (1) grupo homogêneo de acordo com o procedimento estatístico ANOVA - LSD (*Least Significant Difference*), com um nível de confiança de 95,0%, não existindo diferença entre os métodos de levantamento topográfico utilizados. Os valores estatísticos de viés e curtose padronizados não indicam desvios significativos da normalidade, validando os procedimentos estatísticos aplicados a esses dados.

Assim como os estudos de Alfonso-Torreño et al. (2019) e Da Silva et al. (2016), o método de levantamento topográfico por RPA apresentou acurácia expressiva no cálculo do volume das cunhas de sedimentos dos diques, indicando correlação positiva com R^2 na ordem de 0,986 entre os dois (2) métodos, e valor P abaixo de 0,05, indicando correlações significativamente diferentes de zero. Permitiu a obtenção de informações topográficas tridimensionais da superfície e consequente volume de sedimentos, inclusive em regiões inacessíveis ao método por GNSS, com precisão e elevado grau de detalhamento.

Assim como as análises de tendência e de precisão encontrados por Dias et al., (2015), para os métodos de levantamento topográfico, aqui analisados por pelo procedimento estatístico ANOVA Multifatorial, quanto maior o tamanho do objeto estudado (Volume) menor será a probabilidade de erro. Logo, quanto menor o tamanho da variável 'Volume' menos confiáveis são os resultados em relação aos dados com Volumes maiores. Consequentemente o Erro Padrão se torna um fator inversamente proporcional à variável Volume.

Dentre os métodos aplicados, os levantamentos praticados com RPA mostraram grande eficiência, com tempo de levantamento topográfico de apenas dois (2) dias de campo, comparados com os seis (6) dias pelo método por GNSS. Com uma equipe reduzida, executando as atividades com a plataforma RPA, foi mapeada uma área de 239 ha e adquirindo grande quantidade de dados (51 milhões de pontos e densidade média de 327,93 pontos/m³), comparados aos 3471 pontos e densidade de 0,194 pontos/m³ do levantamento por GNSS. Desta forma demonstra eficácia superior na aquisição de dados topográficos quanto ao tempo e volume de dados, corroborando com os resultados apresentados por Alfonso-Torreño et al. (2019) e Da Silva et al. (2016). O tempo de processamento das fotografias para obter as nuvens de pontos, bem como os MDTs e os ortomosaicos foi de 2 h e 10 min (usando uma CPU Intel Core i7 de 2,00 GHz com 8GB de RAM e GPU AMD Radeon HD 7500M).

Um tempo adicional de 36 h foi utilizado para filtrar, editar e classificar as nuvens de pontos.

Um fato limitante da metodologia proposta por levantamento aéreo, é a inviabilidade de sua prática para áreas com cobertura vegetal densa (ALFONSO-TORREÑO et al., 2019; WESTOBY et al., 2012; GÓMEZ-GUTIÉRREZ et al., 2018), assim, tais áreas de interesse, com elevada densidade vegetal, devem ser levantadas por métodos de topografia terrestre, com o auxílio de equipamentos como Estações Totais ou Teodolito (RAMOS-DIEZ et al., 2017; WEI et al., 2017).

2.5. Conclusão

Os métodos de obtenção de dados por aerolevanteamento com imagens geradas por RPA, comparados com os métodos de topografia terrestre por GNSS, para a obtenção de volume de sedimentos, demonstraram que:

Não há diferença estatisticamente significativa entre os dados de Volume (m^3) dos métodos (RPA e GNSS), com um nível de confiança de 95,0%. Os valores estatísticos de viés e curtose padronizados não indicam desvios significativos da normalidade, validando os procedimentos estatísticos.

Foi observado correlação significativa entre a topografia por RPA e GNSS, com R^2 na ordem de 0,986 entre os métodos e valor P abaixo de 0,05.

Para o método de obtenção de dados por RPA, quanto maior o tamanho do objeto estudado (Volume) menor será a probabilidade de erro. Consequentemente, o Erro Padrão se torna um fator inversamente proporcional à variável Volume.

Por fim, pelo método de aerolevanteamento por RPA obteve-se uma densidade de pontos com valores topográficos significativamente superior ao método topográfico por Estação total e GNSS RTK e seus respectivos produtos.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer ao CNPq e a CAPES por viabilizarem os estudos do primeiro autor no Brasil (Bolsa de Doutorado - N° do Processo: 142067/2016-4) e na Espanha (Programa de Doutorado Sanduiche no exterior-PDSE - N° do Processo: 88881.190461/2018-01), ao professor Sergio Campo pela Orientação no Brasil e à

Universidade espanhola de Castilla-La Mancha, na pessoa do Professor Manuel Esteban, pela orientação e ensinamentos durante meu estágio de doutorado no exterior.

REFERÊNCIAS

ABEDINI, M., MD SAID, M.A., AHMAD, F., 2012. Effectiveness of check dam to control soil erosion in a tropical catchment (The Ulu Kinta Basin). *Catena* 97, 63–70. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.05.003>.

ALFONSO-TORREÑO, A.; GÓMEZ-GUTIÉRREZ, A.; SCHNABEL, S.; J-FRANCISCO, L. C.; BLASCO, J. J. DE S.; FERNÁNDEZ, M. S. 2019. sUAS, SfM-MVS photogrammetry and a topographic algorithm method to quantify the volume of sediments retained in check-dams. *Science of the Total Environment*. 678 (8) 369–382. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969719318741>.

BAADE, J., FRANZ, S., REICHEL, A., 2012. Reservoir siltation and sediment yield in the Kruger National Park, South Africa: a first assessment. *Land Degrad. Dev.* 23, 586–600. <https://doi.org/10.1002/ldr.2173>.

BELLIN, N., VANACKER, V., VAN WESEMAEL, B., SOLÉ-BENET, A., BAKKER, M.M., 2011. Natural and anthropogenic controls on soil erosion in the Internal Betic Cordillera (southeast Spain). *Catena* 87, 190–200. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2011.05.022>

BENTO-GONÇALVES, A., COELHO, C., 1995. Wildfire impacts on soil loss and runoff in dry mediterranean forest, Tejo basin, Portugal: preliminary results. *Proceedings of Course on Desertification in a European Context, Physical and Socio-Economic Aspects, Bruxelles*, p. 361-369.

BENTO-GONÇALVES, A., VIEIRA, ANTÓNIO, ÚBEDA, X., MARTIN, D., 2012. Fire and soils: Key concepts and recent advances. *Geoderma*, Elsevier, Vol. 191, 3-13.

BENTO-GONÇALVES, ANTÓNIO J, VIEIRA, ANTÓNIO, LOURENÇO, L., SALGADO, J., MENDES, L., CASTRO, A., FERREIRA-LEITE, F., 2011b. The importance of pine needles in reducing soil erosion following a low/medium intensity wildfire in Junceda (Portugal) - an experimental design. In *Fire Effects on Soil Properties. Proceedings of the 3rd International Meeting of Fire Effects on Soil Properties*, Guimarães.

BOIX-FAYOS, C., BARBERÁ, G.G., LÓPEZ-BERMÚDEZ, F., CASTILLO, V.M., 2007. Effects of check dams, reforestation and land-use changes on river channel morphology: case study of the Rogativa catchment (Murcia, Spain). *Geomorphology* 91:103–123. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2007.02.003>

BOIX-FAYOS, C., DE VENETE, J., MARTÍNEZ-MENA, M., BARBERÁ, G.G., CASTILLO, V., 2008. The impact of land use change and check-dams on catchment sediment yield. *Hydrol. Process.* 22, 4922–4935. <https://doi.org/10.1002/hyp.7115>.

BOMBINO, G., GURNELL, A.M., TAMBURINO, V., ZEMA, D.A., ZIMBONE, S.M., 2009. Adjustements in channel form, sediment calibre and vegetation around check-dams in the headwater reaches of mountain torrents, Calabria, Italy. *Earth Surf. Processes. Landf.* 34 (7), 1011–1021. <https://doi.org/10.1002/esp.1791>.

BORJA, M. E. L, FONSECA T., LOUSADA, J. L., SANTOS, P. S., MARTÍNEZ GARCÍA, E., ABELLÁN, M. A. Natural regeneration of Spanish black pine (*Pinus nigra* Arn. ssp. *salzmannii* (Dunal) Franco) at contrasting altitudes in a Mediterranean mountain area. ***Ecological Research*** 27(5): 913-921. 2012.

BOWMAN, D. M. J. S., BALCH, J. K., ARTAXO, P., BOND, W. J., CARLSON, J. M., COCHRANE, M. A., D'ANTONIO, C. M., DEFRIES, R. S., DOYLE, J. C., HARRISON, S. P., JOHNSTON, F. H., KEELEY, J. E., KRAWCHUK, M. A., KULL, C. A., MARSTON, J. B., MORITZ, M. A., PRENTICE, I. C., ROOS, C. I., SCOTT, A. C., SWETNAM, T. W., VAN DER WERF, G. R., PYNE, S. J. (2009) Fire in the Earth System. *Science* 324(5926), 481–484.

CARVALHO, A., MONTEIRO, A., FLANNIGAN, M., SOLMAN, S., MIRANDA, A. I., BORREGO, C. (2011) Forest fires in a changing climate and their impacts on air quality. *Atmospheric Environment* 45(31), 5545–5553.

CASTILLO, V.M., MOSCH, W.M., CONESA GARCÍA, C., BARBERÁ, G.G., NAVARRO CANO, J.A., LÓPEZ-BERMÚDEZ, F., 2007. Effectiveness and geomorphological impacts of check dams for soil erosion control in a semiarid Mediterranean catchment: El Cárcavo (Murcia, Spain). *Catena* 70 (3), 416–427. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.11.009>.

CERTINI, G., 2014. Fire as a soil-forming factor. *Ambio* 43:191–195. <https://doi.org/10.1007/s13280-013-0418-2>.

CUCCHIARO, S., CAVALLI, M., VERICAT, D., CREMA, S., LLENA, M., BEINAT, A., MARCHI, L., CAZORZI, F., 2019. Geomorphic effectiveness of check dams in a debris-flow catchment using multi-temporal topographic surveys. *Catena* 174, 78–83. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.11.004>.

DA SILVA, A. S.; DUARTE, C. R.; SOUTO, M. V. S.; SANTOS A. L. S.; AMARO, V. E.; BICHO, C. P.; SABADIA, J. A. P. Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando VANT, GNSS e LiDAR. *Bol. Ciênc. Geod.*, v. 22, no1, p.73 – 94. 2016.

DIAS, G. M.; PETER, J. C.; PEREIRA, M.; ROCHA, R. S.; REISS, M. Levantamento de limites de imóvel rural a partir de fotografias obtidas por VANT, apoiadas por pontos GNSS. *Revista Cartográfica*, v91, p.35-58, 2015.

DÍAZ, A. R., LLORIS, M. M., SERRATO, F. B., 2004. Erosion Control Policy in Segura Basin (Spain): Hydrological Correction Checkdams Building To Prevent Reservoir Silting. <https://doi.org/10.13140/2.1.3652.9921>.

DÍAZ, V., J. MONGIL, AND J. NAVARRO. 2014. "Proposal of a New Methodology to Assess the Effectiveness of Check-Dams | Propuesta de Una Nueva Metodología Para Determinar La Efectividad de Los Diques En La Retención de Sedimentos." *Cuadernos de Investigacion Geografica* 40(1): 169–90.

DÍAZ, V., MONGIL, J., NAVARRO, J., 2014. Topographical surveying for improved assessment of sediment retention in check dams applied to a Mediterranean badlands restoration site (Central Spain). *J. Soils Sediments* 14, 2045–2056. <https://doi.org/10.1007/s11368-014-0958-5>.

ESPAÑA. Real Decreto 1036, de 15 de diciembre 2017. Por el que se regula la utilización civil de las aeronaves pilotadas por control remoto, y se modifican el Real Decreto 552/2014, de 27 de junio, por el que se desarrolla el Reglamento del aire y disposiciones operativas comunes para los servicios y procedimientos de navegación aérea y el Real Decreto 57/2002, de 18 de enero, por el que se aprueba el Reglamento de Circulación Aérea. *Boletín Oficial del Estado*, Madrid, 15 dic. 2017.

FERREIRA, A. J. D., COELHO, C. O. A., SHAKESBY, R. A., BOULET, A. K., ALEGRE, S. P., STOOFF, C., KEIZER, J. J. Connectivity and thresholds in water and sediment transport in burned areas, Portugal. **Final Cost Conference**. Aveiro, 2008. 66 p.

GÓMEZ-GUTIÉRREZ, Á., SCHNABEL, S., DE SANJOSÉ, J.J., LAVADO CONTADOR, J.F., 2012. Exploring the relationships between gully erosion and hydrology in rangelands of SW Spain. *Z. Geomorphol.*, 27–44 <https://doi.org/10.1127/0372-8854/2012/S-00071> Supplementary Issues 56.

GÓMEZ-GUTIÉRREZ, Á., SCHNABEL, S., LAVADO CONTADOR, F., SANJOSE, J.J., ATKINSON, A.D.J., PULIDO FERNANDEZ, M., SÁNCHEZ FERNÁNDEZ, M., 2018. Studying the influence of livestock pressure on gully erosion in rangelands of SW Spain by means of the UAV+SfM workflow. *B. Asoc. Geógr. Esp.* 78, 66–88. <https://doi.org/10.21138/bage.2712>.

GÓMEZ-SÁNCHEZ, E., DE LAS HERAS, J., LUCAS-BORJA, M., MOYA, D., 2017. Assessing Fire Severity in Semi-arid Environments: Application in Donceles 2012 Wildfire (SE Spain). *Rev. Teledetección* No 49 (2017). Special Issue: Avances en el análisis de la severidad y la dinámica ambiental post-fuego mediante teledetección <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7121>.

GONZÁLEZ-ROMERO, J.; LUCAS-BORJA, M. E.; PLAZA-ÁLVAREZ, P. A.; SAGRA, J.; DE LAS HERAS, J. Temporal effects of post-fire check dam construction on soil functionality in SE Spain. *Science of the Total Environment*, 642, 117-124, 2018.

HERGUIDO SEVILLANO, E., LAVADO CONTADOR, J.F., PULIDO, M., SCHNABEL, S., 2017. Spatial patterns of lost and remaining trees in the Iberian wooded rangeland. *Appl. Geogr.* 87, 170–183. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.08.011>.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. World map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol. Z.* v. 15, 259–263. 2006.

MARTÍNEZ, J., VEGA-GARCIA, C., CHUVIECO, E. (2009) Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of Environmental Management* 90(2), 1241–1252.

MAVSAR, R., VARELA, E., CORONA, P., BARBATI, A., MARSH, G. (2012) Economic, legal and social aspects of post-fire management. In Moreira F, Arianoutsou M, Corona P (eds.) "Post- Fire Management and Restoration of Southern European Forests", Springer Netherlands, 45–78.

MEKONNEN, M., KEESSTRA, S.D., BAARTMAN, J.E., RITSEMA, C.J., MELESSE, A.M., 2015. Evaluating sediment storage dams: structural off-site sediment trapping measures in northwest Ethiopia. *Cuad. Investig. Geográfica* 41:7. <https://doi.org/10.18172/cig.2643>.

MEKONNEN, M., KEESSTRA, S.D., STROOSNIJDER, L., BAARTMAN, J.E.M., MAROULIS, J., 2014. Soil conservation through sediment trapping: a review. *Land Degrad. Dev.* 556:544–556. <https://doi.org/10.1002/ldr.2308>.

NADEU, E., QUIÑONERO-RUBIO, J.M., DE VENTE, J., BOIX-FAYOS, C., 2015. The influence of catchment morphology, lithology and land use on soil organic carbon export in a Mediterranean mountain region. *Catena* 126:117–125. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.11.006>.

NICHOLS, M.H., MCREYNOLDS, K., REED, C., 2012. Short-term soil moisture response to lowtech erosion control structures in a semiarid rangeland. *Catena* 98. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.06.010>.

PECHONY, O., SHINDELL, D. (2010) Driving forces of global wildfires over the past millennium and the forthcoming century. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107(45), 19167–19170.

PULIDO, M., SCHNABEL, S., LAVADO CONTADOR, J.F., LOZANO-PARRA, J., GONZÁLEZ, F., 2018. The impact of heavy grazing on soil quality and pasture production in rangelands of SW Spain. *Land Degrad. Dev.* 29 (2), 219–230. <https://doi.org/10.1002/ldr.2501>.

RAMOS-DIEZ, I., NAVARRO-HEVIA, J., SAN MARTÍN FERNÁNDEZ, R., DÍAZ-GUTIÉRREZ, V., MONGIL-MANSO, J., 2016. Evaluating methods to quantify sediment volumes trapped behind check dams, Saldaña badlands (Spain). *Int. J. Sediment Res.* <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.06.005>.

RAMOS-DIEZ, I., NAVARRRO-HEVIA, J., SAN MARTÍN FERNÁNDEZ, R., MONGIL-MANSO, J., 2017. Final analysis of the accuracy and precision of methods to calculate the sediment retained by check dams. *Land Degrad. Dev.* 28, 2446–2456. <https://doi.org/10.1002/ldr.2778>.

RAMOS-DIEZ, IVÁN et al. 2017. "Evaluating Methods to Quantify Sediment Volumes Trapped behind Check Dams, Saldaña Badlands (Spain)." *International Journal of Sediment Research* 32(1): 1–11. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsrc.2016.06.005>.

RIESCO GARCÍA, J.A., 2015. Análisis comparativo de la estimación de la erosión hídrica con la metodología USLE y las técnicas RS SIG. Aplicación al entorno del tramo medio de la cuenca del río Jarama (Guadalajara). Thesis, Departamento de Ingeniería y Gestión Forestal y Ambiental, Universidad Politécnica de Madrid. Online at: <http://oa.upm.es/39075/>. Accessed on 28/10/2018.

RIVAS-MARTÍNEZ, S.; DÍAZ, T. E.; FERNÁNDEZ-GONZÁLEZ, F.; IZCO, J.; LOIDI, J.; LOUSÃ, M.; PENAS.; (2002). Vascular plant communities of Spain and Portugal. *Itinera Geobot.* v.15, n (1,2), 5-922, 2002.

ROMERO-DÍAZ, A., ALONSO-SARRIÁ, F., MARTÍNEZ-LLORIS, M., 2007a. Erosion rates obtained from check-dam sedimentation (SE Spain). A multi-method comparison. *Catena* 71, 172–178. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2006.05.011>.

ROMERO-DÍAZ, A., MARTÍNEZ LLORIS, M., ALONSO SARRIÁ, F., 2007b. Los diques de corrección hidrológica. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Murcia. Editum, Murcia, p. 270.

RUBIO-DELGADO, J., SCHANABEL, S., GÓMEZ-GUTIÉRREZ, Á., SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, M., 2018. Estimation of soil erosion rates in dehesas using the inflection point of holmoaks. *Catena*, 166, 56-67. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.03.017>.

SAN-MIGUEL-AYANZ, J., MORENO, J. M., CAMIA, A. (2013) Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: Lessons learned and perspectives. *Forest Ecology and Management* 294, 11-22.

SCHNABEL, S., CEBALLOS BARBANCHO, A., GÓMEZ-GUTIÉRREZ, Á., 2010. Erosión hídrica en la dehesa extremeña. In: SCHNABEL, S., LAVADO CONTADOR, J.F., GÓMEZ-GUTIÉRREZ, Á., GARCÍA MARÍN, R. (Eds.), *Aportaciones a la Geografía Física de Extremadura con especial referencia a las dehesas*. Asociación Profesional para la Ordenación del Territorio, el Ambiente y el Desarrollo Sostenible, España, pp. 153–185.

SCHNABEL, S., DAHLGREN, R.A., MORENO-MARCOS, G., 2013. Soil and water dynamics. In: Campos, P., Oviedo, J.S., Díaz, M., Montero, G. (Eds.), *Mediterranean Oak Woodland Working Landscapes, Dehesas of Spain and Ranchlands of California*. Springer, pp. 91–122.

SHAKESBY, R.; BOAKES, D., COELHO, C.; BENTO-GONÇALVES, A. E WALSH, R. 1993. Limiting the erosional effect of forest fires: background to the IBERLIM research programme in Águeda and Tejo basins, Portugal. *Swansea Geographer*, nº 30; Swansea, p. 132 - 154.

SHAKESBY, R.; BOAKES, D., COELHO, C.; BENTO-GONÇALVES, A. E WALSH, R. 1996. Limiting the soil degradation impacts of wildfire in pine and eucalyptus forests,

Portugal: comparison of alternative post-fire management practices. *Applied Geography*, vol. 16, nº 4, Elsevier Science Ltd, p. 337-355.

USDA, 1999. Soil taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. Second edition. *Geol. Mag.* 114 (886). <https://doi.org/10.1017/S0016756800045489>.

VEGA, J.; SERRADA, R.; HERNANDO, C.; RINCÓN, A.; OCAÑA, L.; MADRIGAL, J.; FONTÚRBEL, M.; PUEYO, J.; AGUILAR, V.; GUIJARRO, M.; CARRILLO, A.; FERNÁNDEZ, C. E MARINO, E. 2010. Actuaciones técnicas post-incendio y severidade del fuego: Proyecto Rodenal. In *Actas das Jornadas Internacionais – Investigación y gestión para la protección del suelo y restauración de los ecosistemas forestales afectados por incendios forestales*, Santiago de Compostela, 2010, p. 305-308.

VERSTRAETEN, G., POESEN, J., 2002. Regional scale variability in sediment and nutrient delivery from small agricultural watersheds. *J. Environ. Qual.* 31 (3), 870–879. <https://doi.org/10.2134/jeq2002.8700>.

WALSH, R.; COELHO, C.; ELMES, A.; FERREIRA, A.; BENTO-GONÇALVES, A.; SHAKESBY, R.; TERNAN, J. E WILLIAMS, A. 1998. Rainfall simulation plot experiments as a tool in overland flow and soil erosion assessment, North-Central Portugal. *Geokodynamik*, vol. XIX, 3-4, Bensheim, p. 139-152.

WEI, Y., HE, Z., LI, Y., JIAO, J., ZHAO, G., MU, X., 2017. Sediment yield deduction from check-dams deposition in the weathered sandstone watershed on the North Loess Plateau, China. *Land Degrad. Dev.* 28, 217–231. <https://doi.org/10.1002/ldr.2628>.

WESTOBY, M.J., BRASINGTON, J., GLASSER, N.F., HAMBREY, M.J., REYNOLDS, J.M., 2012. 'Structure-from-motion' photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>.

WHITE, P., BUTCHER, D., LABADZ, J., 1997. Reservoir sedimentation and catchment sediment yield in the Strines catchment, UK. *Phys. Chem. Earth* 22, 321–328. [https://doi.org/10.1016/S0079-1946\(97\)00152-3](https://doi.org/10.1016/S0079-1946(97)00152-3).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos referentes à obtenção de dados de Cotas topográficas por aerolevanteamento com RPAs, comparados com os métodos de topografia terrestre por GNSS, mostraram que quanto melhor a resolução das imagens (GSD) maior o nível de detalhamento e conseqüente diminuição Erro no modelo topográfico. DA mesma forma foi comprovado que quanto maior a taxa de sobreposição das imagens menor será a probabilidade ao Erro no modelo topográfico.

Da mesma forma deve ser considerada a contraindicação de métodos com baixo aporte de dados de GSD e de Sobreposição em levantamentos aerofotogramétricos por RPAs, os quais podem apresentar Erros Médios severos comparados aos levantamentos com apreciável volume de dados.

Apesar dos valores das análises de variância, que demonstraram diferenças entre os níveis analisados, os estudos demonstraram que todos os métodos analisados estão em uma condição extremamente aceitável do ponto de vista de comparação direta dos valores de cotas.

Os métodos de obtenção de dados volumétricos por aerolevanteamento com RPAs, comparados com os métodos de topografia terrestre por GNSS, demonstraram que não há diferença estatisticamente significativa entre os dados de Volume (m^3) dos métodos (RPAs e GNSS), sendo observado correlação muito forte.

Para o método de obtenção de dados por RPA, quanto maior o tamanho do objeto estudado (Volume) menor será a probabilidade de erro. Conseqüentemente o Erro Padrão se torna um fator inversamente proporcional à variável Volume.

Por fim, pelo método de aerolevanteamento por RPA obteve-se uma densidade de pontos com valores topográficos significativamente superior ao método topográfico por Estação total e GNSS RTK e seus respectivos produtos.

REFERÊNCIAS

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. Instrução Suplementar - IS Nº 21-002 Revisão A, de 4 de outubro de 2012. Orienta a emissão de Certificado de Autorização de Voo Experimental com base no Regulamento Brasileiro da Aviação Civil nº 21 – RBAC 21 para Veículos Aéreos Não Tripulados – VANT. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 05 out. 2012. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/iac-e-is/is/is-21-002a/@@display-file/arquivo_norma/IS%2021-002A.pdf>. Acesso em: 13 abr. 2018.

DOUBECK, A. **Topografia**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1989.

MATESE, A.; TOSCANO, P.; DI GENNARO, S. F.; GENESIO, L.; VACCARI, F. P.; PRIMICERIO, J.; BELLI, C.; ZALDEI, A.; BIANCONI, R.; GIOLI, B. Intercomparison of UAV, Aircraft and Satellite Remote Sensing Platforms for Precision Viticulture. **Remote Sensing**, Finland, v. 7, n. 3, p. 2971-2990, 2015.

MUNARETTO, L. **VANT e Drones: a aeronáutica ao alcance de todos**. 2ªed. São Paulo: Oficina de Texto, 2017.

RODRIGUES, B. T.; RODRIGUES, M. T.; CAMPOS, S.; CAMPOS, M.; TARUMOTO, M. B. **Possibilidades e métodos de utilização no uso de DRONES/VANTS na agricultura**. In: PUTTI, F. F.; SILVA, A. L. C.; GABRIEL FILHO, L. R. A. (Orgs). *Tecnologias em agricultura sustentável*. Tupã-SP: Editora ANAP - Associação Amigos da Natureza da Alta Paulista, 2017. p. 249-269.