

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

JOSÉ OTÁVIO DE ALMEIDA BUENO

Estimativa de altura utilizando imagens obtidas por drone em sistema integrado
de produção agropecuária

São Carlos

2021

JOSÉ OTÁVIO DE ALMEIDA BUENO

Estimativa de altura utilizando imagens obtidas por drone em sistema integrado
de produção agropecuária

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de
São Carlos da Universidade de São Paulo, como
requisito para obtenção do título de mestre em
Ciências da Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Silvio Crestana

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

B928e Bueno, José Otávio de Almeida
Estimativa de altura utilizando imagens obtidas por
drone em sistema integrado de produção agropecuária /
José Otávio de Almeida Bueno; orientador Silvio
Crestana. São Carlos, 2021.

Dissertação (Mestrado) - Programa de
Pós-Graduação e Área de Concentração em Ciências da
Engenharia Ambiental -- Escola de Engenharia de São
Carlos da Universidade de São Paulo, 2021.

1. Sensoriamento remoto. 2. Geoprocessamento. 3.
Modelo digital de altura. 4. Sistema integrado. I.
Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Bacharel **JOSÉ OTÁVIO DE ALMEIDA BUENO**.

Título da dissertação: "Estimativa de altura utilizando imagens obtidas por drone em sistema integrado de produção agropecuária".

Data da defesa: 02/09/2021.

Comissão Julgadora

Resultado

Dr. **Silvio Crestana**

Aprovado

(Orientador)

(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/EMBRAPA)

Dr. **Alberto Carlos de Campos Bernardi**

Aprovado

(Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária /EMBRAPA)

Profª. Associada **Valeria Guimarães Silvestre Rodrigues** Aprovado

(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Ciências da Engenharia Ambiental:

Prof. Associado **Frederico Fabio Mauad**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**

DEDICATÓRIA

Este trabalho é dedicado à minha família, por desde cedo terem me ensinado qual é o caminho a verdade e a vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por em todo tempo ter sido meu pastor e em nenhum momento da minha vida ter me deixado faltar a sua presença, assim como Ele prometeu.

À minha mãe e minha tia Paula, que é uma segunda mãe para mim, por sempre se dedicarem ao máximo para que os meus objetivos fossem possíveis de se tornarem realidade.

Aos meus irmãos que mesmo sendo mais novos, sempre me ajudaram no processo da graduação e da Pós, seja com apoio financeiro ou com palavras que me motivaram a seguir em frente.

À minha esposa, Bruna Félix de Almeida, por não me deixar desistir e por sempre estar ao meu lado, me apoiando e me mostrando os motivos para seguir em frente.

À família da minha esposa, que hoje também é minha família, por sempre estarem ao nosso lado, nos ajudando a seguir em frente em nossas carreiras e dando todo amor e suporte.

Ao meu orientador, professor Silvio Crestana, por ser um ser humano incrível, por todo apoio, incentivo e otimismo, além de sempre estar disposto a ajudar e por contribuir com soluções imediatas.

Ao Prof. Dr. Vandoir Bourscheidt pela ajuda durante o projeto.

Ao Dr. Alberto Carlos de Campos Bernardi, pela amizade, pelas orientações e apoio nos momentos difíceis, sempre presente e disposto a ajudar independente de qualquer coisa.

Ao grupo de pesquisa “Team Silvio”.

A todos que me ajudaram em alguma etapa durante a graduação e a Pós, sejam professores, amigos ou colaboradores do PPGSEA - USP e do curso de Gestão e Análise Ambiental – UFSCar.

A Embrapa Pecuária Sudeste, por ter disponibilizado a área para a pesquisa. E aos colegas Edilson e Pezzopane.

A Embrapa Instrumentação.

Ao CNPq pela bolsa concedida.

RESUMO

BUENO, J. O. A. **Estimativa de altura utilizando imagens obtidas por drone em sistema integrado de produção agropecuária**. 2021. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Com os avanços tecnológicos surgem novas oportunidades de se obter dados de sensoriamento remoto usando diversos equipamentos, como as fotografias aéreas obtidas por câmeras digitais acopladas aos drones. Utilizar fotografias aéreas de pequeno formato é uma das técnicas de sensoriamento remoto que torna possível caracterizar florestas, mapear danos causados por incêndios, realizar contagem de copas e estimativas de altura de objetos. Para realizar medidas de altura para áreas de interesse de estudo, são amostradas menos que 5% das árvores. Sendo assim, tendo em vista o fato de obter dados de forma rápida, precisa e que possam ser reproduzidos de maneira eficiente, este estudo visou estimar altura de eucaliptos, utilizando imagens capturadas por drone em um sistema integrado de produção agropecuária. Como o Modelo Digital de Altura gerado utiliza como base um Modelo Digital de Terreno (MDT), inicialmente o estudo comparou as variações entre as altitudes desses modelos obtidas por quatro fontes de dados, a saber: a do próprio drone empregado na pesquisa; imagens capturadas utilizando veículo aéreo tripulado; imagem de satélite; e altitudes obtidas com GPS (Sistema de Posicionamento Global) geodésico, sendo que os resultados para essa análise mostraram que há variação entre os valores dos intervalos de altitude, todavia mesmo com as diferenças observadas nos números, as variações de ambos os MDT se acompanham ao longo de toda área de estudo. Os resultados obtidos por meio do Modelo Digital de Altura, gerado pela subtração do Modelo Digital de Superfície pelo MDT, permitiram estimar a altura das árvores com resultados que foram correlacionados com as alturas aferidas em campo com clinômetro e o valor do coeficiente de correlação de Pearson (r) foi de 0,58, com uma diferença média entre as alturas de 0,9m. Posteriormente, os dados de altura estimados foram submetidos a técnicas de geoestatística, interpolando os dados por meio da Krigagem Ordinária, os resultados de correlação entre as alturas interpoladas com base nos valores extraídos do MDA, com as alturas medidas em campo apresentaram o valor de 0,38 para o Coeficiente de Correlação de Pearson. O processamento de imagens de drone, aliado ao geoprocessamento mostraram resultados promissores em se tratando de estimar altura de árvores em sistema integrado de produção agropecuária.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto; Geoprocessamento; Modelo digital de altura; Sistema integrado.

ABSTRACT

BUENO, J. O. A. **Height estimation using images obtained by drone in an integrated agricultural production system.** 2021. Dissertação (Mestrado) – São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, 2021.

With technological advances, new opportunities arise to obtain remote sensing data using various equipment, such as aerial photographs taken using digital cameras coupled to drones. Using small-format aerial photography is one of the remote sensing techniques that makes it possible to characterize forests, map fire damage, perform canopy counts and estimate the height of objects. To perform height measurements for study areas of interest, less than 5% of the trees are sampled. Thus, given the fact of obtaining data quickly, accurately and that can be efficiently reproduced, this study aimed to estimate the height of eucalyptus trees, using images captured by drones in an integrated agricultural production system. As the Digital Height Model generated uses a Digital Terrain Model (DTM) as a basis, the study initially compared the variations between the altitudes of these models obtained by four data sources, namely: the drone used in the research; images captured using a manned aerial vehicle; satellite image; and altitudes obtained with geodetic GPS, and the results for this analysis showed that there is variation between the values of the altitude intervals, however even with the differences observed in the numbers, the variations of both DTM are accompanied throughout the entire study area. The results obtained through the Digital Height Model, generated by the subtraction of the Digital Surface Model by the DTM, allowed to estimate the height of the trees with results that were correlated with the heights measured in the field with a clinometer and the value of the Pearson correlation coefficient (r) was 0.58, with an average difference between heights of 0.9m. Subsequently, the estimated height data were submitted to geostatistical techniques, interpolating the data using Ordinary Kriging, the correlation results between the interpolated heights based on the values extracted from the Digital Height Model, with the heights measured in the field had a value of 0.38 for the Pearson Correlation Coefficient. The processing of aerial drone images, combined with geoprocessing, showed promising results in terms of estimating tree height in an integrated agricultural production system.

Keywords: Remoting sensing; Geoprocessing; Digital height model; Integrated system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Modelos de ARP	24
Figura 2. Localização geográfica da área de estudo	29
Figura 3. Detalhe da lateral da área de estudo com o espaçamento entre as fileiras e a distância entre as árvores	30
Figura 4. Visadas na base até o topo da árvore	32
Figura 5. Fluxograma metodológico da etapa 4.3.1	33
Figura 6. Localização geográfica das árvores	39
Figura 7. Percurso de voo realizado com drone, os triângulos representam o momento em que as imagens foram capturadas.....	40
Figura 8. Sobreposição das imagens capturadas com drone, os números indicam a quantidade de imagens sobrepostas	40
Figura 9. Número de pontos correspondentes no percurso entre as imagens capturadas com drone.....	41
Figura 10. Percurso de voo realizado com o veículo aéreo tripulado, os triângulos representam o momento em que as imagens foram capturadas	42
Figura 11. Sobreposição das imagens capturadas com veículo aéreo tripulado	43
Figura 12. Número de pontos correspondentes no percurso entre as imagens capturadas com veículo aéreo tripulado.....	44
Figura 13. Modelo Digital de Terreno (drone).....	45
Figura 14. Modelo Digital de Terreno (veículo aéreo tripulado)	46
Figura 15. Modelo Digital de Terreno elaborado com base na imagem do satélite ALOS	46
Figura 16. Modelo Digital de Terreno elaborado com base nos pontos de altitude do GPS geodésico.....	47
Figura 17. Malha com 700 pontos, gerada para extrair as informações de altitude nos mesmos locais de cada MDT	48
Figura 18. Gráfico de Caixas com as altitudes (m) dos MDT.....	49
Figura 19. Gráfico de linhas representando as variações de altitudes dos MDT	50
Figura 20. Mapa de declividade da área de estudo feito com base nas imagens aéreas capturadas pelo drone.....	51
Figura 21. Mapa de declividade da área de estudo feito com base nos pontos de altitude coletados com GPS Geodésico	51
Figura 22. MDS elaborado com base nas imagens capturadas pelo drone	52

Figura 23. Modelo Digital de Altura.....	53
Figura 24. Localização geográfica das árvores que foram medidas com clinômetro.....	53
Figura 25. Localização geográfica dos locais das árvores com medidas encontrados no MDA	55
Figura 26. Histograma das alturas das árvores extraídas do MDA	55
Figura 27. Semivariograma das alturas das árvores extraídas do MDA.....	56
Figura 28. Interpolação por Krigagem das árvores com medidas encontradas no MDA.....	57
Figura 29. A - Percurso de voo (1) entre as linhas das árvores; B – Percurso do voo (2); C- Percurso do voo (3); D – Percurso do voo (4), os triângulos representam o momento em que as imagens foram capturadas.....	80
Figura 30. Número de pontos correspondentes no percurso entre as imagens capturadas com drone para o voo (1) - entre as linhas das árvores	81

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Vantagens e desvantagens das ARP	24
Tabela 2. Interpretação do Coeficiente de Correlação de Pearson	37
Tabela 3. Estatística descritiva das altitudes referentes aos MDT	48
Tabela 4. Estatística descritiva dos dados de altura medidos em campo e estimados pelo MDA	54
Tabela 5. Validação cruzada das alturas das árvores extraídas do MDA	56
Tabela 6. Estatística descritiva dos dados de altura medidos em campo e interpolados por Krigagem.....	57
Tabela 7. Valores de DAP, número de pontos e localização geográfica de cada árvore.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ARP – Aeronave Remotamente Pilotada

DAP – Diâmetro na Altura do Peito

GNSS – Global Navigation Satellite System

GPS – Sistema de Posicionamento Global

IDE – Índice de Dependência Espacial

IDW – Inverso Ponderado da Distância

ILPF – Integração Lavoura Pecuária Floresta

JAXA – Agência de Exploração Aeroespacial do Japão

LiDAR – Light Detection and Ranging

MDA – Modelo Digital de Altura

MDE – Modelo Digital de Elevação

MDS – Modelo Digital de Superfície

MDT – Modelo Digital de Terreno

ODM – OpenDroneMap

PALSAR – Radar Polarimétrico de Abertura Sintética de Banda Larga

r – Coeficiente de Correlação de Pearson

R^2 - Coeficiente de Determinação

ROA – Aeronave Operada Remotamente

RPV – Veículo Pilotado Remotamente

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SR – Sensoriamento Remoto

UAV/UAS – Unmanned Aerial Vehicles/Systems

VANT – Veículo Aéreo Não Tripulado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	16
2.1 Geral	16
2.2 Específicos	16
3 REVISÃO DA LITERATURA	17
3.1 Fotogrametria e <i>Structure From Motion (SFM)</i>	17
3.2 Geoprocessamento e sensoriamento remoto	19
3.3 Geoestatística	21
3.4 Drones: breve histórico e nomenclaturas	23
3.5 Sistema integrado de produção agropecuária	26
4 MATERIAL E MÉTODOS	29
4.1 Área de estudo	29
4.2 Procedimento geral	30
4.3 Altura	31
4.3.1 Aferição de altura e localização geográfica das árvores	31
4.3.2 Coleta de imagens aéreas.....	33
4.4 Modelos Digitais de Terreno	35
4.4 Declividade	36
4.5 Modelo Digital de Altura	37
4.6 Interpolação dos dados de altura	38
5 RESULTADOS	39
6 CONCLUSÕES	59
7 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	60
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
APENDICE A	77
APENDICE B	78
APENDICE C	79

1 INTRODUÇÃO

Os drones foram desenvolvidos inicialmente para uso militar com o propósito de executar missões sem que houvesse risco de morte da tripulação a bordo (COLOMINA; MOLINA, 2014; SLOMPO, 2013). Posteriormente, começaram a ser produzidos vários modelos em todo o mundo (COLOMINA; MOLINA, 2014). A redução do tamanho dos componentes eletrônicos, a eficácia dos resultados, aliado a possibilidade de se adquirir informações mais detalhadas dos dados de campo, contribuíram para o aumento do número de projetos que envolvem o uso dessa tecnologia (AKTURK; ALTUNEL, 2019; FRASER; VAN; HALL, 2017; SLOMPO, 2013).

Em seguida, os drones passaram a ser utilizados também para mapeamento de áreas, e o avanço dos estudos, bem como os resultados, indicaram que a tecnologia é adequada para utilização na área da fotogrametria (AKTURK; ALTUNEL, 2019; PRZYBILLA; WESTER-EBBINGHAUS, 1979; WESTER-EBBINGHAUS, 1980). O termo drone também possui outras definições entre nomes e siglas. Costumeiramente são utilizados os termos Aeronave Remotamente Pilotada (ARP) e VANT, se referindo a Veículo Aéreo Não Tripulado (LONGHITANO, 2010). No geral, são veículos projetados para voar sem piloto, controlados remotamente (SARIPALLI; MONTGOMERY; SUKHATME, 2003; UYSAL; TOPRAK; POLAT, 2015).

Conforme já descrito, essa tecnologia foi utilizada inicialmente para uso militar. No entanto, a sua utilização está se tornando cada vez mais constante em aplicações de monitoramento de diversas áreas, sejam elas comerciais ou governamentais, como inspeção de linhas de energia, verificação de danos estruturais em edifícios e, na agricultura de precisão onde se pode acompanhar o crescimento desigual das plantações e identificação de doenças, fato que destaca o enorme potencial da tecnologia para monitoramento e inspeção (DOERING et al., 2014; GIUFFRIDA, 2015).

Dentre os produtos gerados após o processamento das imagens capturadas por câmeras acopladas aos drones, têm-se os Modelos Digitais de Elevação (MDE), que são produtos topográficos essenciais para muitas aplicações (UYSAL; TOPRAK; POLAT, 2015). Os métodos clássicos são mais caros e demorados para geração dos MDE devido ao levantamento topográfico, fato que contribuiu para a fotogrametria se tornar um dos métodos mais comumente utilizados para produção de MDE (AKTURK; ALTUNEL, 2019; UYSAL; TOPRAK; POLAT, 2015).

É possível gerar dois modelos digitais, no processamento das imagens capturadas, sendo: Modelo Digital de Terreno (MDT) e Modelo Digital de Superfície (MDS) (VAN

IERSEL et al., 2018). A diferença de altitude, entre os dois modelos digitais, gera o Modelo Digital de Altura (MDA), utilizado para extrair informações de altura dos objetos que estão acima do nível do solo, tais como vegetação, edifícios, árvores e biomassa (AVTAR et al., 2020; BATISTOTI et al., 2019; HUNG et al., 2018).

Para estimar o volume de madeira de espécies florestais é necessário medir em campo variáveis dendrométricas (NUTTO et al., 2001). Essas variáveis são amostradas, normalmente, em parcelas de campo, em que segundo Nutto et al., (2001) e Sanqueta (2002), mede-se, na maioria das vezes, menos que 5% dos indivíduos da área de interesse. A aplicação de técnicas da geoestatística nos estudos pode contribuir para a resolução de problemas de estimativa, para locais nos quais a amostragem não foi feita, com base nos dados medidos (OLIVEIRA et al., 2015). Essa inferência espacial, de acordo com Yamamoto e Landin (2013) é chamada de interpolação e é fundamentada em ajustes de funções matemáticas locais ou globais.

Com relação às variáveis dendrométricas, alguns autores têm utilizado diversas técnicas e equipamentos para estimá-las, como a estimativa de altura feita com bastão (SCOLFORO; FIGUEIREDO FILHO, 2008), avaliação visual (CURTO et al., 2013; SILVA et al., 2012), hipsômetro (CAMPOS; LEITE, 2013), além de técnicas automáticas utilizando sensoriamento remoto como LiDAR – Light Detection and Ranging (GIONGO et al., 2010), Laser Scanner Terrestre (LINGNAU et al., 2009) e modelo tridimensional de nuvem de pontos (BUCK et al., 2012).

Quando comparado com as técnicas de sensoriamento remoto (SR) obtidas via satélite, o uso dos drones vem surgindo como uma alternativa mais viável, além de fornecer benefícios em relação a tempo, custos e mão de obra (ABER; MARZOLF; RIES, 2010; GRAÇA, 2017). Utilizar fotografias aéreas de pequeno formato é uma das técnicas de SR que torna possível caracterizar florestas, mapear danos causados por incêndios, e realizar a contagem de copas (CASBEER et al., 2005; DISPERATTI et al., 2007; FENG; LIU; GONG, 2015).

O SR possibilita obter informações que se assemelham ao levantamento realizado diretamente no campo, entretanto, tem-se a possibilidade de realizar a amostragem do ambiente de uma maneira mais rápida (SILVA, 2016). Sendo assim, tendo em vista o fato de obter dados de forma rápida, precisa, sem que haja o abatimento das árvores e que possam ser reproduzidos de maneira eficiente, o presente estudo estimou a altura de eucaliptos, utilizando imagens aéreas capturadas com a utilização de drone, e utilizou técnicas de geoestatística para interpolar os resultados do Modelo Digital de Altura (MDA).

Desta maneira, a hipótese do estudo foi de que é viável estimar altura de eucaliptos no sistema de Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF) da Embrapa Pecuária Sudeste,

processando imagens do visível adquiridas com o uso de drone e aplicação de geoprocessamento.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

Estimar altura de eucaliptos obtidos por meio do processamento das imagens capturadas por drone e aplicação de geoprocessamento, com os valores aferidos em campo.

2.2 Específicos

- Verificar se há variação entre os intervalos de altitudes obtidas nos MDT gerados a partir de quatro diferentes fontes de dados;
- Verificar a correlação entre as alturas dos eucaliptos estimadas após o processamento das imagens e aplicação de geoprocessamento, com as aferidas em campo;
- Aplicar técnicas de geoestatística no MDA e verificar qual a correlação entre as alturas após a aplicação das técnicas, com as aferidas em campo.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Fotogrametria e *Structure From Motion (SFM)*

Fotogrametria é a ciência e tecnologia que se trata de adquirir informações confiáveis por meio de imagens adquiridas utilizando sensores (COELHO; BRITO, 2007). Ainda segundo os autores, o termo deriva das palavras gregas photos, que significa luz; gramma, que significa algo desenhado ou escrito e metron, que significa "medir". Portanto, fotogrametria, de acordo com suas origens, significa "medir graficamente usando luz" (COELHO; BRITO, 2007).

Com base nos dados adquiridos via sensores remotos, são elaborados os mapas e cartas topográficas; fotointerpretação, que consiste em obter dados qualitativos a partir da análise das fotografias e de imagens de satélite (WESTOBY et al., 2012). Os métodos mais antigos de processamento dos dados fotogramétricos requeriam instrumentos analógicos. O advento de computadores cada vez mais equipados, permitiu uma redução da participação instrumental no processo fotogramétrico, levando a um aumento na precisão e a uma sofisticação nos modelos matemáticos (TAVANI; CORRADETI; BILLI, 2016).

A fotogrametria aérea (ou Aerofotogrametria) é uma subdivisão da fotogrametria, na qual as fotografias do terreno são tomadas por uma câmara de precisão montada em uma aeronave (CARRIVICK; SMITH; QUINCEY, 2016). Neste sentido, Coelho e Brito (2007) destacam que o principal objetivo da fotogrametria pode ser descrito como a reconstrução de um espaço tridimensional a partir de um conjunto de imagens bidimensionais.

A obtenção de produtos fotogramétricos a partir de aerofotogrametria utilizando drones e câmeras digitais de pequeno formato, não métricas e não pré-calibradas, é possível devido ao advento da técnica computacional denominada *Structure From Motion (SFM)* (PASSALACQUA et al., 2015).

Os métodos clássicos para geração de dados de superfície e subsuperfície demandam muito tempo, custo ou ainda conhecimentos específicos de processamento, em contrapartida a fotogrametria digital com os algoritmos do fluxo de trabalho SFM, vem se mostrando um instrumento bastante útil, eficaz e de baixo custo, para produção de informações de qualquer superfície ou objeto desejado (CAWOOD et al., 2017).

Segundo Micheletti et al., (2015), a capacidade do uso de métodos baseados em SFM para extrair dados espaciais de alta resolução e acurácia, utilizando câmeras digitais comuns, é realmente notável e pode atender a uma série de novas investigações no campo da pesquisa científica.

A técnica do fluxo de trabalho (SFM) usa algoritmos para identificar recursos correspondentes em um conjunto de imagens digitais sobrepostas e calcula a localização e a

orientação da câmera a partir das posições diferenciais de vários recursos correspondentes (CARRIVICK; SMITH; QUINCEY, 2016; SZELISK, 2010). Com base nesses cálculos, as imagens sobrepostas podem ser usadas para reconstruir um modelo de nuvem de pontos 3D esparsa da superfície fotografada (TAVANI; CORRADETI; BILLI, 2016).

Esta abordagem é, no entanto, mais adequada para conjuntos de imagens com alto grau de sobreposição que capturam a estrutura tridimensional completa da cena vista de uma ampla gama de posições ou, como o nome sugere, imagens derivadas de um sensor em movimento (SNAVELY, 2008).

VITTI (2017) destaca que a descrição dos elementos é feita com base na capacidade do algoritmo em procurar e encontrar os chamados pontos de interesse 2D, que por sua vez representam o mesmo ponto físico 3D, sendo que cada conjunto de pontos que são codificados com a mesma cor faz parte da projeção do mesmo ponto 3D. Assim, são realizados cálculos automáticos que servem para descrever uma correção local de pixels ao redor de cada ponto de interesse.

O objetivo principal da técnica é realizar a correspondência de pontos que são comuns para reconstruir um determinado objeto ou superfície, sendo que, cada ponto obtido por meio das diversas imagens durante o levantamento aéreo é composto por uma posição 3D, e uma cor extraída de uma certa imagem (FONSTAD et al., 2013; SNAVELY; SEITZ; SZELISK, 2008).

A reconstrução dos objetos e superfícies é feita gerando um modelo 3D georreferenciado, denominado MDS (Modelo Digital de Superfície), isto é, um modelo topográfico composto por todas as estruturas presentes na área como vegetação e construções, enquanto que o MDT, também possível de ser gerado, representa apenas os dados do relevo, desconsiderando os objetos acima do nível do solo (VITTI, 2017).

Posteriormente, esse modelo, associado com as posições da câmera do drone no momento do voo e os parâmetros de orientação interior, possibilita a produção de ortofotos, em que todos os objetos, com relação às suas respectivas alturas, são posicionados com precisão (VERHOEVEN et al., 2013). Uma série de aplicativos que realizam processamento SFM está disponível atualmente, como Agisoft Photoscan, Visual SFM (MICHELETTI; CHANDLER; LANE, 2015), OpenDroneMap (SANTOS; KOENIGKAN, 2018), Bundler, COLMAP, MicMac (ORTIZ-SANZ et al., 2021).

Uma abordagem geral sobre os algoritmos utilizados no fluxo de trabalho desta técnica pode ser encontrada em Fonstad et al., (2013), James; Robson; Smith (2012), Micheletti et al., (2015) e Westoby et al., (2012). Segundo Micheletti et al., (2015), a implementação de algoritmos, opções e características de processamento pode variar para cada software,

entretanto, a essência desta técnica constitui-se da captura de uma série de imagens sobrepostas de uma cena ou objeto em diferentes posições, utilizando uma câmera digital, para gerar modelos tridimensionais.

3.2 Geoprocessamento e sensoriamento remoto

As transformações vividas pela sociedade a partir dos avanços tecnológicos no âmbito da análise ambiental proporcionaram uma melhor compreensão da relação entre o ser humano e o meio ambiente, para isso a obtenção de informações sobre a distribuição de recursos minerais, naturais e de propriedades sempre foi uma importante parte das atividades das sociedades organizadas (GREGÓRIO; PANIAGO, 2013).

Com o desenvolvimento da tecnologia de informática na segunda metade do século XXI, tornou-se possível armazenar e representar tais informações em ambiente computacional, abrindo espaço para o aparecimento do Geoprocessamento (TEXEIRA, 2015). A primeira ocorrência de tentativas de automatizar parte do processamento de dados com características espaciais acontece na Inglaterra e nos Estados Unidos, nos anos 50, com o principal objetivo de reduzir os custos de produção e manutenção de mapas (CÂMARA; DAVIS, 2003).

Desde então, o Geoprocessamento vem sendo desenvolvido e utilizado com êxito em diversas áreas, como na engenharia, biologia, geologia, entre outras. Xavier (2000) define geoprocessamento como um ramo do processamento de dados, que opera transformações nos dados contidos em uma base referenciada territorialmente (geocodificada), na qual se incluem as imagens de SR usando recursos analíticos, gráficos e lógicos, para obtenção e apresentação das transformações desejadas.

O geoprocessamento agrega vários tratamentos multidisciplinares de dados espaciais, como por exemplo o SR, os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), geoestatística e cartográfica digital, e possui uma gama grande de aplicação na análise de informações ambientais (OLIVEIRA, 2011; WEIS et al., 2013).

O SIG por sua vez é considerado uma ferramenta que auxilia e facilita o processamento dessa grande quantidade de informações permitindo a integralização de dados, sejam ambientais ou técnicos, em modo gráfico e temporal (VEIGA; SILVA, 2004). É caracterizado por sistemas que conectam informações geográficas a bancos de dados contendo outros tipos de informações por meio de análises complexas, com a finalidade de desenvolver análises espaciais e modelagens da superfície (VALLE; FRANCELINO; PINHEIRO, 2016).

O termo geoprocessamento é um conceito amplo que abrange e representa qualquer tipo de processamento de dados georreferenciados, porém muitas vezes é confundido com o

conceito sobre as ferramentas utilizadas com auxílio para o seu uso. Sendo assim este termo é caracterizado pela disciplina do conhecimento que faz uso de técnicas computacionais e matemáticas para tratar a informação geográfica e vem influenciando de maneira crescente áreas do conhecimento como a Cartografia e Planejamento Urbano e Regional (CÂMARA, 2001).

Sousa (1996) afirma que devido ao fato de o Brasil ser um país de grandes dimensões continentais e com carência de informações, o geoprocessamento já se apresentava com enorme potencial de uso. A este propósito, Dainese (2001) afirma que o geoprocessamento passa a ser ainda mais útil, pois converte informações do mundo real para o sistema computacional.

Um exemplo de aplicação e utilização das ferramentas de geoprocessamento, no ramo ambiental, foi sua aplicação para mapear a fragilidade ambiental, no trabalho de Kawakubo et al., (2005) em que foram utilizadas técnicas de geoprocessamento como a Modelagem Numérica do Terreno (MNT), SR e álgebra de campo. A utilização dessas técnicas apresenta significativa eficiência para contribuir com a melhora do gerenciamento dos recursos naturais (LIMA NETO, 2011).

Nesta perspectiva, é notório a evolução do geoprocessamento que se tornou um conjunto de ferramentas de grande importância, devido a capacidade de coleta de dados espaciais imprescindível para estudos na área ambiental, sendo utilizado para diversos fins, tais como monitoramento de usos do solo, cobertura vegetal, ocupação desordenada e irregular, níveis de erosão do solo, poluição da água e do ar, prevenção e combate a incêndios, entre outros (WEIS et al., 2013).

O SR, por sua vez, pode ser definido como a obtenção de informações de uma área, por meio de sensores que captam a energia eletromagnética refletida por um alvo, sem que haja contato direto com ele (JENSEN, 2000). A distância do sensor acoplado aos equipamentos, para se realizar o SR, em relação à superfície ou alvo, é variável e pode ser classificada em três níveis de altitude, sendo eles o orbital (representado por satélites), aéreo (aeronaves e helicópteros) e terrestre (sensores radiométricos de campo) (PONZONI, 2002).

A utilização desses sensores, em determinado nível de coleta de informações espectrais, dependerá de uma série de fatores relacionados com o que se quer alcançar com a pesquisa, tais como tamanho da área, disponibilidade de equipamentos, custo e precisão desejados para os resultados (SILVA; MELO; OLIVEIRA, 2005). Em relação às questões ambientais, o uso de sensoriamento remoto vem sendo cada vez mais importante, ao passo que suas imagens polissêmicas e os incontáveis recursos contribuem para a aplicação em distintas temáticas

(KALAF et al., 2013). Florenzano (2002) destaca que, se tratando de estudos ambientais, o sensoriamento remoto é reconhecidamente uma ferramenta muito útil.

O fato do SR realizado por drones não oferecer risco de vida para tripulantes, se configura como sendo uma vantagem em relação ao transportado por aeronaves tripuladas. Mesmo os principais projetos de drones sendo relativamente onerosos, ainda assim demandam menos investimento que uma aeronave tripulada ou um satélite utilizado para o mesmo fim (JENSEN, 2009).

Ainda com relação a essa comparação mencionada, as principais vantagens do SR, feito por uso de drones, estão a redução dos custos de obtenção de imagens aéreas, e a maior flexibilidade de resolução temporal para aquisição de imagens de alta resolução espacial (SLOMPO, 2013). Portanto, o uso dessas técnicas tem auxiliado em tarefas como a simulação do espaço geográfico, dos processos naturais e na integração de informações espaciais, o que contribui significativamente no auxílio para tomada de decisões estratégicas em relação ao meio ambiente (NICOLETTI; FERREIRA, 2015).

3.3 Geoestatística

A geoestatística surgiu quando Krige (1951) trabalhando com dados de concentração de ouro, verificou que para encontrar sentido nas variâncias em estudo era preciso levar em conta as distâncias entre as amostras, e assim surgiu o conceito da geoestatística ou teoria das variáveis regionalizadas, que leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial (CAMARGO, 2006; SILVESTRE, 2016).

Geoestatística é um ramo da estatística que utiliza conceito de variáveis regionalizadas na avaliação de variabilidade espacial. Não se limita apenas em obter um modelo de dependência espacial, pretende também estimar valores de pontos nos locais onde não foram coletados (GOOVAERTS, 1997; SRIVASTAVA, 1996). Santos (2017) e Zanao et al., (2010) destacam os passos de cálculo da semivariância, construção ajuste do semivariograma aos modelos teóricos e a interpolação por Krigagem, os tipos de variogramas bem como suas características.

Segundo Oliveira et al., (2015) a geoestatística se refere ao estudo de um fenômeno natural que é ou pode ser definido pela distribuição no espaço de uma ou mais variáveis. O estudo da geoestatística tem início com uma coleta de amostra, sendo que esta amostra será utilizada para representar as características de toda a população ou do fenômeno espacial que está em foco na pesquisa, sendo que a amostragem deve ser realizada com uma disposição regular ou o mais próximo disso, todavia algumas amostragens podem ocorrer em zonas de

interesse maior o que pode acarretar em agrupamento de pontos, sendo que estes agrupamentos devem ter seus efeitos atenuados para evitar a distorção das estatísticas globais (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Com a geoestatística pode-se estimar o valor de uma dada propriedade para um local onde não foi medida, utilizando uma função de correlação espacial entre os dados sem viés e com variância mínima (VIEIRA, 2000). Para estimar esses valores, comumente se usa o método de interpolação por krigagem, cujo nome foi dado em homenagem a Daniel G. Krige (YAMAMOTO; LANDIN, 2013).

Krigagem consiste em ponderar os vizinhos mais próximos do ponto a ser estimado, obedecendo os critérios de não tendenciosidade, que significa que em média a diferença entre valores estimados e observados para o mesmo ponto deve ser nula e ter mínima variância, ou seja, que os estimadores possuam a menor variância dentre todos os estimadores não tendenciosos (CARVALHO, 2014). Os pontos com menores distâncias entre si, por estarem correlacionados, terão uma variância pequena a qual será maior na medida em que os pontos vão se distanciando (KRUGUER, 2005).

Este método de interpolação utiliza funções matemáticas, correlação espacial e o ajuste dos modelos teóricos para acrescentar pesos de acordo com as posições dos dados, sendo menores para as posições mais distantes e a partir disso criar novos pontos interpolados tendo como base as combinações lineares de dados (JAKOB, 2002).

Outro método para se realizar a interpolação dos dados é o IDW (o inverso ponderado da distância) o método, segundo Varella e Junior (2008) se baseia na dependência espacial, ou seja, supõe que quanto maior a proximidade de um ponto do outro, maior deverá ser a correlação entre seus valores. Sendo assim, pesos maiores são adotados para amostras mais próximas do que para amostras mais distantes do ponto a ser interpolado.

Fazendo uma comparação entre a estatística clássica e a geoestatística, podemos dizer que a primeira necessita da normalidade e independência espacial entre os dados, enquanto que a geoestatística requer a autocorrelação espacial. A estatística clássica assume que os pontos de observação são independentes, o que, na maioria dos casos, não acontece nos estudos envolvendo as ciências da terra (SILVESTRE, 2016; SRIVASTAVA, 1996).

A geoestatística, bastante consolidada em estudos de solos, independentemente do tamanho da área amostrada (GOMES et al., 2010; GOOVAERTS, 1997; GREGO; VIEIRA, 2005; WARRICK; NIELSEN, 1980), tem potencial para diversas outras aplicações envolvendo ciências da terra e do ambiente (SOARES, 2006). Portanto, segundo Molin (2002) traz grande contribuição para a agricultura de precisão (CARVALHO et al., 2014).

3.4 Drones: breve histórico e nomenclaturas

Os drones foram produzidos inicialmente para uso militar, com o propósito de executar missões sem que houvesse risco de morte da tripulação a bordo. Posteriormente, começaram a ser produzidos vários modelos em todo o mundo, devido à redução do tamanho dos componentes eletrônicos ocorridos nas últimas décadas, fato que contribuiu para o aumento do número de projetos que envolvem essa tecnologia (SLOMPO, 2013).

Outros motivos que estão relacionados a esse crescimento estão os avanços na tecnologia computacional, desenvolvimento de software, materiais mais leves, sistemas globais de navegação, sensores mais sofisticados e a miniaturização (JORGE; INAMASU, 2014).

Outras expressões, embora menos utilizadas, podem ser mencionadas, tais como Remotely Operated Aircraft – ROA (Aeronave Operada Remotamente), Remote Piloted Vehicle – RPV (Veículo Pilotado Remotamente), que são definições específicas para Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) (LONGHITANO, 2010).

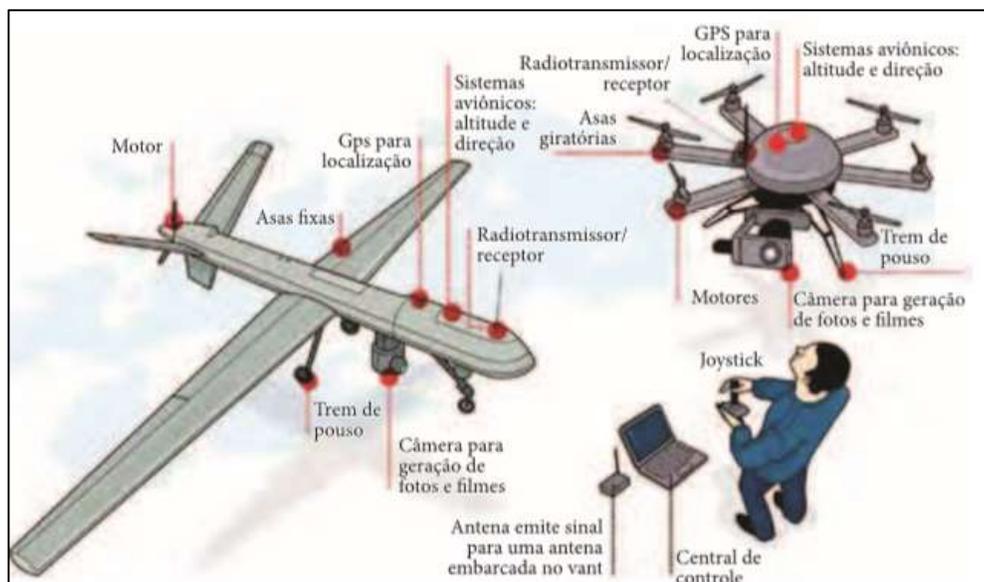
Outra terminologia comum e mais ampla é a de Unmanned Aerial Vehicles/Systems (UAV/UAS), que de acordo com a Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC (2012) significa toda aeronave que é projetada para voar sem piloto a bordo e que não seja utilizada tão somente para fins recreativos.

Jorge e Trindade Junior (2002) destacam que, ainda que a aeronave não possua um operador a bordo, seus princípios de funcionamento seguem os mesmos das convencionais, todavia, com um tamanho reduzido. No Brasil, a ARP com tecnologia 100% própria do país foi o projeto Arara (Aeronave de Reconhecimento Autônoma e Remotamente Assistida), construído com o objetivo de tomar o lugar das aeronaves convencionais na obtenção de imagens para monitoramento agrícola (ALVES JÚNIOR, 2015).

O componente principal dessa tecnologia, segundo Neris (2001), é um sistema de controle que mantém a aeronave estabilizada e proporciona que ela faça manobras que a conduzam por uma rota e missão selecionada, especialmente com o uso de aplicativos e plataformas específicas desenvolvidos para esta finalidade.

De acordo com Jorge e Inamasu (2014), essas aeronaves podem ser classificadas quanto ao alcance e altitude e diferem em sua asa fixa ou rotativa, sendo que a de asa rotativa pode ser do tipo helicóptero convencional ou multirrotor. Na Figura 1, pode ser observada a configuração típica.

Figura 1. Modelos de ARP



Fonte: ANDRADE, 2013

Na Tabela 1 podem ser observadas as principais vantagens e desvantagens dos diferentes tipos de ARP, de acordo com Jorge e Inamasu (2014) e Medeiros (2007), em função do tipo de asa. No mercado atual, basicamente existem os dois tipos, que se diferenciam quanto ao sistema aerodinâmico. Ambos podem ser equipados com diversos tipos de sensores, tais como o infravermelho, câmeras, radar, Sistema de Posicionamento Global (GPS), além de outros dispositivos de comunicação especializados (MELO; COSTA, 2015).

Tabela 1. Vantagens e desvantagens das ARP

Aeronaves Remotamente Pilotadas				
Tipo Aspecto	Asa fixa		Asa rotativa	
	Vantagem	Desvantagem	Vantagem	Desvantagem
Pouso e decolagem	Quando se usa catapulta para decolagem e paraquedas para pouso	Necessidade de área de pouso e decolagem	Em qualquer lugar pousa e decola	—
Trajectoria	Capacidade de realizar rotas longas	Depende de condições de vento para manter rota	Possui a capacidade de realizar rota determinada e pode pairar num ponto de interesse	—

Condições climáticas	Grau de tolerância maior para voar com ventos fracos	–	Possui tolerância maior para voar inclusive com ventos fortes	–
Custos	Custos de construção e manutenção relativamente baixos	–	Baixo custo de manutenção e médio custo de aquisição	
Transporte	Pode ser desmontado o que facilita o transporte	–	Fácil transporte	–
Carga	Suporta uma carga considerável	–	–	Suporta pouca carga

Fonte: Adaptado de Jorge e Inamasu (2014) e Medeiros (2007).

Jorge e Inamasu (2014) destacam que Przybilla e Wester-Ebbinghaus (1979) foram os primeiros a realizarem experimentos utilizando aeronaves sem piloto em fotogrametria, voando com velocidade suficiente para se obter imagens aceitáveis mesmo em movimento. Avultam também que no Brasil, na área civil, já na década de 80, se tem como destaque o Helix, de asa móvel, que não obteve avanço por falta de mercado e incentivo do governo, todavia, outras iniciativas que foram criadas em universidades, acabaram se tornando empresas que alimentaram o mercado com diferentes tipos de ARPs, como a Flight Solutions, XMobots, Airship, Skydrones, dentre outras.

Os drones vêm sendo amplamente utilizados como plataformas para aquisição de dados, destacam-se, como suas principais aplicações: a agricultura de precisão, ações de segurança nacional (missão militares), planejamento urbano e monitoramento ambiental (FIGUEIRA; VOLOTAO, 2012).

Tokarczyk (2015) aponta que até pouco tempo a grande maioria dos estudos sobre extração da superfície terrestre estavam focados em imagens de satélites. Porém, o autor relata que os drones permitem obter imagens de altíssima resolução em nível local com um custo inferior quando comparado ao uso de sensores orbitais, sendo possível realizá-lo de modo rápido com grau de detalhe adequado ao objetivo do estudo.

Segundo Pande-Chhetri et al., (2017), a facilidade da repetição dos voos permite a obtenção de imagens com alta resolução temporal as quais são de grande valia para o monitoramento de alvos mais dinâmicos. Quanto ao nível de voo, baixas altitudes permitem

que os sensores observem o solo a partir de posições mais próximas coletando dados de resolução espacial mais refinados.

Como desvantagens do uso de imageamento por drone podem-se citar a limitação nas aplicações em áreas de estudo muito grandes, a alta demanda de espaço para armazenamento dos dados, e de potentes hardwares e softwares de processamento (NOOR; ABDULLA; HASHIM, 2018).

Quanto ao contexto ambiental, diversos autores como Silva et al. (2018) e Mendes et al., (2016), evidenciam o uso de imagens de alta resolução associadas ao planejamento territorial e ambiental, objetivando fomentar a conservação ambiental. Nesta perspectiva, os drones apresentam um avanço para o setor de mapeamento ambiental, principalmente quando aliados às técnicas desenvolvidas em âmbito dos SIG (NEX; REMONDINO, 2014), podendo fornecer, além de imagens com alta qualidade, Modelos Digitais de Terreno (MDT) e de Superfície (MDS), polígonos de bacias hidrográficas, redes de drenagem, mapas de declividade, entre outros.

No Brasil, destaca-se também o uso para operações de vigilância de fronteiras e monitoramento em geral, como por exemplo em usinas hidrelétricas e em grandes eventos. Assim, observa-se que o uso dessa tecnologia já é amplamente aceito, inclusive pela comunidade científica de todo o mundo (BARROS et al., 2017).

3.5 Sistema integrado de produção agropecuária

A demanda crescente por alimento, bioenergia e produtos florestais, em contraposição à necessidade de redução de desmatamento e mitigação da emissão de gases de efeito estufa, requer soluções que permitam incentivar o desenvolvimento socioeconômico, sem comprometer a sustentabilidade dos recursos naturais (WALDORF, 2018).

O Brasil possui a capacidade de aumentar exponencialmente a oferta de alimentos, porém deve ser feito isso sem aumentar proporcionalmente a abertura de novas áreas e sem causar grande impacto ao meio ambiente. Sendo assim, o grande desafio consiste em aumentar a produtividade das lavouras e recuperar áreas degradadas pela pecuária, bem como simultaneamente otimizar o uso da água e dos fertilizantes e dos solos (ALVES; MADARI; BODDEY, 2017; FOLEY et al., 2005).

Os sistemas agrícolas que favorecem a qualidade do solo são aqueles que cultivam plantas intensivamente, de preferência de espécie diferentes, sem o revolvimento do solo, sendo que a estrutura física do solo será tanto mais complexa quanto maiores forem a quantidade e a

diversidade da fitomassa disponibilizada ao sistema (TONINI et al., 2016; VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

No entanto, a crescente demanda pelo incremento da produção de alimento de maneira eficiente e sustentável tem instigado cientistas, técnicos e produtores rurais a buscarem alternativas de intensificação da pecuária brasileira. Sendo assim, novas técnicas começaram a serem melhoradas e com isso, surgiram os sistemas integrados de produção agropecuária, os quais adotam princípios de conservação dos solos e promovem interações sinérgicas entre a produção animal e vegetal (FRANZLUEBBERS; STUEDEMANN, 2014).

Almeida et. al., (2013), estimaram que os sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta ocupavam aproximadamente quatro milhões de hectares no Brasil, com excelente potencial de crescimento devido à disponibilidade de apoio financeiro aos produtores.

A intensificação da produção observada no sistema de integração melhora as condições físicas, químicas e biológicas do solo; aumenta a ciclagem e a eficiência de utilização dos nutrientes; reduz custos de produção; diversifica e estabiliza a renda na propriedade rural e viabiliza a recuperação de áreas com pastagens degradadas (ALVARENGA et al., 2010; CHERUBIN; TORMENA; KERLEN, 2017).

Uma característica dos sistemas integrados no Brasil é a alternância entre a produção de lavouras e a pastagens na mesma área. Sendo considerado sistemas mais complexos do que aqueles em que apenas gado, safras ou árvores são produzidas separadamente. A presença de mais de um componente vegetal, mais de um estrato, como árvores bem como animais, simultaneamente em um sistema, resulta em interações que variam no tempo e no espaço (SILVA, 2012).

A elevação dos teores de matéria orgânica e a melhoria da qualidade física do solo pela introdução do sistema ILPF em áreas agrícolas com níveis adequados de fertilidade evidenciam o potencial deste sistema em reduzir não apenas o impacto ambiental das atividades produtivas, mas também as emissões de gases de efeito estufa melhorando o aproveitamento da água e dos nutrientes do solo (BALBINO; MARTINEZ; GALERANI, 2011).

Neste sentido, tem-se observado que nas áreas com sistemas integrados de cultivo a qualidade do solo é superior em relação às áreas com monocultivo (LOSS et al., 2012; MAIA et al., 2006). Sendo assim, os componentes da ILPF devem estar integrados para que ocorra uma interação favorável com o meio ambiente. Nesta perspectiva, a lavoura envolve as atividades de preparo da terra e o cultivo de culturas agrícolas, este é o componente mais exigente dentro do sistema tanto em termos de fertilidade do solo quanto no manejo empregado na área (GONTIJO et al., 2018).

Ainda segundo Gontijo et al., (2018), lavouras bem nutridas representam maior retorno econômico com suas produtividades durante os primeiros anos, além disso, são os fertilizantes residuais das lavouras que alavancarão a produtividade das pastagens em sucessão por maior tempo, sendo que as árvores também serão beneficiadas desses nutrientes.

Já os animais são, produto e ferramenta de manejo, pois, dentro de uma visão integrada do sistema, desempenham importante papel na manutenção de menor competitividade do sub-bosque com o componente arbóreo, em função do consumo da forragem. Também aceleram a ciclagem de nutrientes, por meio do retorno de fezes e urina ao solo em compostos mais facilmente mineralizáveis, e antecipam o retorno de capital investido, quando comparados à monocultura florestal (BUNGENSTAB, 2012; GIL; SIEBOLD; BERGER, 2015).

A escolha de um componente florestal dentro de um sistema ILPF é de extrema importância também, pois devem ser consideradas espécies para múltiplos usos, que proporcionem madeira de qualidade para diferentes segmentos permitindo a entrada de várias receitas durante seu ciclo produtivo, além de se observar o objetivo principal do sistema e a finalidade/qualidade da madeira, a distribuição das árvores deve facilitar o tráfego de máquinas e implementos (PANG; VAN; NAVARRETE, 2019).

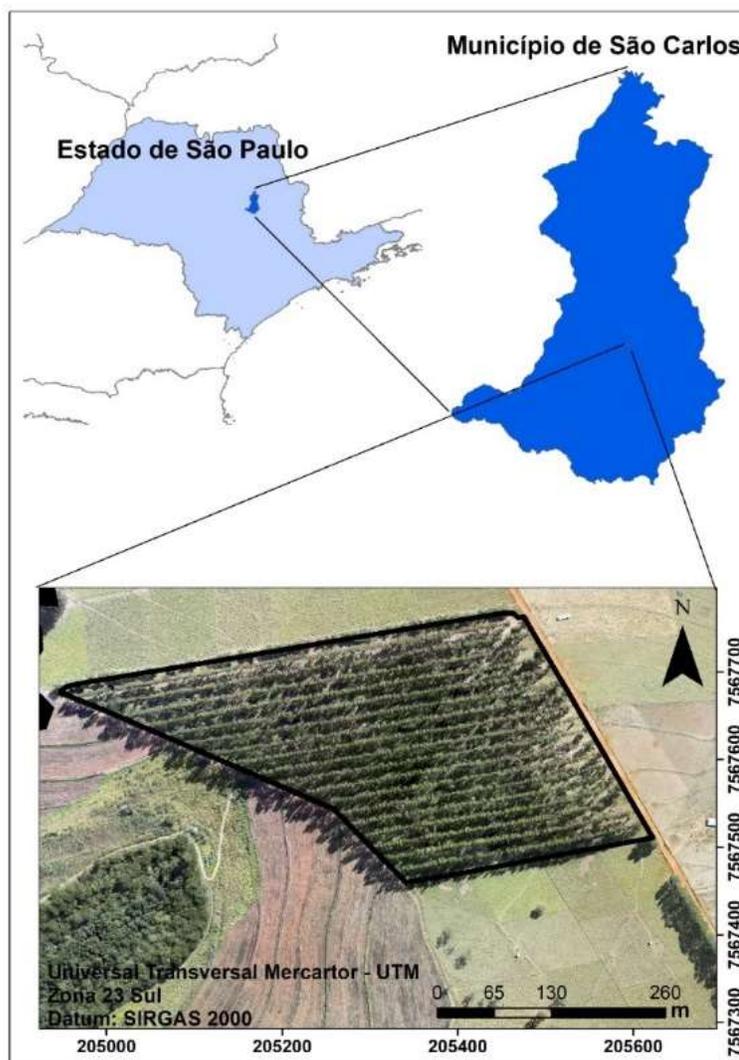
Diante do exposto, o sistema ILPF está sendo considerado inovador e uma excelente solução com alto potencial na recuperação de áreas degradadas e, assim, na supressão de desmatamento de novas áreas para o uso na agropecuária. Porém, é imprescindível se estabelecer indicadores adequados para detecção das mudanças na qualidade do solo pela transformação de sistemas convencionais em sistemas ILPF, para que assim, se possa obter melhor desempenho de uma forma racional e sustentável, minimizando perdas e gerando economia, além de maior diversificação de produtos agropecuários dentro da propriedade (ASSIS et al., 2015).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Área de estudo

O estudo foi realizado no sistema de Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF), da Embrapa Pecuária Sudeste, localizada no município de São Carlos, estado de São Paulo, Brasil (Figura 2). O solo da área é classificado como Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico com textura argilosa média (CALDERANO FILHO et al., 1998). O clima da localidade é tropical (classificação de Köppen: Cwa), com duas estações bem definidas, sendo de abril a setembro (seca) com temperatura média de 19,9 °C e precipitação de 250mm, e de outubro a março (úmida) com temperatura média de 23,0 °C e 1100 mm de precipitação (PEZZOPANE et al., 2021).

Figura 2. Localização geográfica da área de estudo



Fonte: Elaborado pelo autor

A área do sistema de integração tem 12 hectares (ha), os quais estão divididos em 24 piquetes com 0.5 ha cada, plantado com *Eucalyptus urograndis* (clone GG100) em fileiras simples, na orientação Leste-Oeste com espaçamento de 15 metros entre linhas e distância de 4 metros entre árvores dentro das linhas (Figura 3) e sistemas de pastagens de capim-piatã (BERNARDI et al., 2019; PEZZOPANE et al., 2019b).

Figura 3. Detalhe da lateral da área de estudo com o espaçamento entre as fileiras e a distância entre as árvores



Fonte: Elaborado pelo autor

O ILPF foi plantado em abril de 2011, e segundo Pezzopane et al., (2019a), inicialmente as árvores foram dispostas em fileiras simples com espaçamento de 15m entre as linhas e 2m entre as árvores dentro das linhas, resultando em um total de 333 árvores por ha. Em 2016 foi realizado um desbaste com o intuito de remover 50% das árvores, aumentando, assim, o espaçamento entre as árvores nas linhas para 4m (PEZZOPANE et al., 2019a).

4.2 Procedimento geral

Neste tópico está descrito o procedimento metodológico com uma visão geral de forma resumida, utilizado para a realização desta dissertação. O tópico foi escrito com intuito de facilitar a compreensão de quais foram os procedimentos adotados até chegar na etapa final. Em seguida, em outros tópicos serão descritos os procedimentos realizados de forma mais detalhada, bem como os equipamentos e softwares utilizados em cada etapa. A primeira etapa metodológica consistiu em obter em campo as coordenadas geográficas e realizar a aferição dos dados de altura dos eucaliptos na área de estudo.

No mesmo período foram realizados os voos aéreos com o drone e com veículo aéreo tripulado, com o intuito de capturar as imagens do sistema integrado que serviram como base para extrair dados de altura, gerar os mapas e os modelos digitais que serão detalhados ao longo da dissertação.

Após os levantamentos aéreos, as imagens foram processadas para gerar os MDE. Dentre eles, os MDT que foram utilizados como base de comparação, dos intervalos de altitude, com MDT gerados por imagem de satélite e por pontos de altitude (em metros) obtidos com GPS Geodésico. A discussão a respeito dos MDT gerados, pelas diferentes fontes aqui citadas, serviram de base para validar a utilização do MDT gerado pelo processamento das imagens capturadas por drone, o qual foi utilizado para gerar o MDA

Com base no MDT obtido após o processamento das imagens capturadas pelo drone, foi elaborado um mapa de declividade da área de estudo, a ser analisado visualmente com o mapa de declividade extraído das informações dos pontos de altitude obtidos por GPS Geodésico. O objetivo dessa análise foi verificar que, para os dados utilizados neste estudo para gerar os MDA, a utilização das coordenadas geográficas obtidas pelo próprio drone não interfere nos valores de altura das árvores estimadas pelos modelos digitais apresentados. Posteriormente, tendo como base os MDE tanto de terreno, quanto o MDS, foi gerado o MDA, o qual estimou a altura das árvores da área de estudo.

Com o MDA apresentou algumas falhas, com espaços vazios sem valores de altura de árvores, foram utilizadas técnicas de geoestatística para estimar as alturas dos eucaliptos para esses espaços. Em seguida, as medidas de altura, aferidas com clinômetro, foram comparadas com as alturas estimadas pelo MDA e posteriormente com as medidas estimadas pelos métodos de interpolação com base nos valores do MDA. Para toda a base de dados georreferenciada foi utilizado o sistema de projeção geográfica Universal Transversa de Mercator (UTM), fuso 23 Sul, datum SIRGAS 2000. Os procedimentos detalhados para cada etapa metodológica serão descritos nos próximos tópicos.

4.3 Altura

4.3.1 Aferição de altura e localização geográfica das árvores

Os dados de altura medidos em campo, utilizados como base para comparação com o MDA, foram obtidos utilizando um hipsômetro digital (hipsômetro/clinômetro eletrônico Haglof®) que se baseia no princípio trigonométrico, relação entre ângulos e distância (LAURO et al., 2018). O aparelho permite medir ângulos e a altura total dos objetos com precisão, baseado em uma distância conhecida do operador até o alvo (OLIVEIRA et al., 2014). David

(2011) comparou as alturas medidas, com esse aparelho, com as alturas reais obtidas por meio de um método direto e observou que não existem diferenças estatísticas entre as médias.

Para realizar a aferição das alturas dos eucaliptos foi necessário o trabalho de dois operadores. Sendo que após a localização da árvore, a ser mensurada, o operador 1 se desloca até o eucalipto com o intuito de identificar a base da árvore, ao passo que um dos principais problemas relacionados a medição de altura utilizando aparelhos eletrônicos está na dificuldade de o operador visualizar o topo e a base da árvore, sendo que a presença de vegetação rasteira pode dificultar o caminhar na área além de impedir a visualização da base (OLIVEIRA et al., 2014).

A variável altura pode ser definida como a distância linear ao longo do eixo principal da árvore, medida do solo até ao topo ou até outro ponto de referência (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2009). O operador 2, localizado a uma distância de 15 metros da árvore a ser medida, marca essa distância no aparelho. Em seguida, com visadas no aparelho identifica-se a base da árvore e o equipamento é movido até o ponto mais alto do eucalipto (Figura 4), aferindo assim o valor de altura que é observada no visor do próprio aparelho.

Figura 4. Visadas na base até o topo da árvore



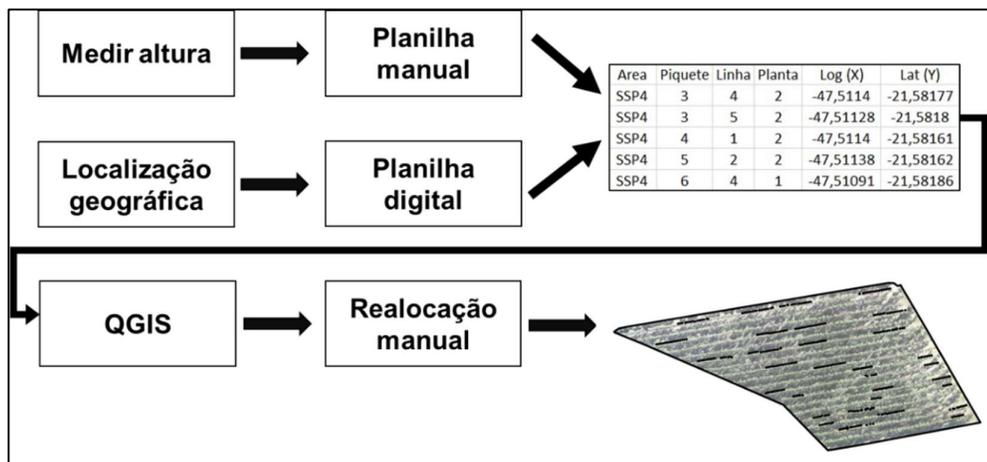
Fonte: Gisiberica

Foram realizadas medições de altura em 15 árvores por piquete experimental. As árvores estão plantadas em fileiras simples e em cada piquete foram medidos 18% dos eucaliptos (PEZZOPANE et al., 2019). Os valores de altura das árvores, bem como a identificação dos eucaliptos, foram anotados em uma planilha manual e em seguida transferidos para uma planilha digital. Os dados das coordenadas geográficas (latitude e longitude) dos eucaliptos medidos em cada piquete foram obtidas com aparelho de GPS portátil, para facilitar a

localização das árvores em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Após obter as coordenadas em campo, os dados foram transferidos para uma planilha digital e em seguida plotados em um ambiente SIG, no software QGIS, o qual permite editar, visualizar e analisar os dados geográficos.

Em uma planilha digital foram vinculados os dados de coordenadas geográficas dos eucaliptos com as respectivas descrições da área, piquete, linha e número da planta em que se realizaram as medidas. No QGIS as coordenadas geográficas das árvores foram convertidas para unidades métricas e realocadas de forma manual com base na imagem da área de estudo, com o intuito do ponto geográfico ficar posicionado na parte central do topo da árvore. O processo em forma de fluxograma metodológico para essa etapa pode ser visualizado na Figura 5.

Figura 5. Fluxograma metodológico da etapa 4.3.1



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3.2 Coleta de imagens aéreas

Para realizar o levantamento aéreo inicialmente, em escritório, foram definidos o limite e o plano de voo, passo no qual se delimita o polígono do terreno para uma área ligeiramente maior que a de estudo (HUNG et al., 2018; INGUAGGIATO, 2020). O drone utilizado foi o Phantom 4 Advanced, da DJI. A câmera é equipada com sensor de 20 megapixels, distância focal de 9mm.

A câmera foi configurada para a primeira etapa na posição para baixo/nadir e na segunda etapa na posição oblíqua/45° e as imagens foram capturadas em cores verdadeiras (RGB) na faixa do visível (AVTAR et al., 2020; VAN IERSEL et al., 2018; YAMAGUCHI et al., 2021). Em solo durante o voo foi utilizado um tablet com sistema operacional Android para

acompanhar o plano de voo e efetuar os comandos (HUNG et al., 2018). A sobreposição de imagens tanto frontal quanto lateral foi de 80% (VAN IERSEL et al., 2018).

O sobrevoo aéreo foi executado de modo automático, após definir o melhor momento para voar com iluminação adequada, baixa quantidade de nuvens e vento calmo, no horário entre às 11h e 12h, a uma altura de 90 metros. A altura do voo influencia no tempo total de cobertura da área e está ligada de forma direta com o Ground Sample Distance (GSD) representação do tamanho do pixel da imagem dos ortomapas (AVTAR et al., 2020; HUNG et al., 2018; SANTOS; KOENIGKAN, 2018).

O levantamento foi realizado nessa altura devido aos custos operacionais do processamento das imagens, sendo que voos mais baixos exigiriam um maior número de baterias utilizadas, além de capturar um número maior de imagens, aumentando em muitas horas o processamento de dados (FIGUEIREDO et al., 2016). AVTAR et al (2020), encontraram maiores correlações para os mapas de altura com voos mais altos, enquanto que os mais baixos apresentaram menor correlação.

Outro fator considerado para a escolha da altura para a execução do levantamento aéreo foi o limite de dois voos um seguido do outro, com duração total de menos de uma hora, ao passo que Van Iersel et al., (2018) destacam que mesmo dentro desse curto período pode haver variações nas condições de vento e iluminação, podendo influenciar na precisão das estimativas de altura.

As imagens capturadas foram armazenadas no cartão de memória da própria câmera, acoplada à aeronave, e em seguida transferidos para o computador para serem processadas. Ressalta-se que os levantamentos foram feitos sem pontos de controle. A utilização de alvos pré-sinalizados requer custos adicionais significativos em relação ao planejamento, implantação e medição em campo (COSTA; SILVA, 2012). Assim, foi tomado como base a orientação das coordenadas obtidas pelo GNSS (Global Navigation Satellite System) da própria aeronave (COLOMINA; MOLINA, 2014; HUNG et al., 2018).

Outras imagens aéreas da área de estudo foram coletadas por um veículo aéreo tripulado - equipado com câmera de 20 megapixels e distância focal de 35mm -, pela empresa Airscout®, por meio de sobrevoos a uma altura de 600 metros entre as 11h e 14h30 (LAURENTTI et al., 2019) e disponibilizadas para a pesquisa, com o intuito de gerar um MDT.

O processamento das imagens se deu no software OpenDroneMap (ODM) que é um sistema de código aberto, ou seja, pode ser acessado gratuitamente, onde são realizadas uma série de procedimentos, utilizando a técnica SFM, tais como: geração da nuvem de pontos; produção de ortofotos, geração do Modelo Digital de Superfície – MDS e de Terreno – MDT

(HE et al., 2021; OCA; FLORES, 2021; ORTIZ-SANZ et al., 2021; SANTOS; KOENIGKAN, 2018).

4.4 Modelos Digitais de Terreno

Nesse item estão descritos os procedimentos para realização dos Modelos Digitais de Terreno obtidos após o processamento das imagens capturadas pelo drone; MDT obtido após processamento das imagens aéreas capturadas por veículo aéreo tripulado pela Airscout ®; MDT obtido com base em imagem de satélite; MDT obtido com base em dados de altitude do GPS Geodésico.

Durante os procedimentos nos softwares, como no caso do ODM, Hung et al., (2018) elencam que primeiro é gerada a nuvem de pontos, sendo que estes representam o relevo e as feições que estão acima dele, posteriormente são realizadas as separações entre os pontos do relevo e dos demais objetos e por fim com os pontos apenas do relevo faz-se uma interpolação para gerar o MDT.

O MDT obtido pelo processamento das imagens capturadas pelo drone, foi gerado no software ODM e em seguida exportado em formato raster para o QGIS, onde foram realizados os procedimentos para verificar se haviam espaços vazios, devido a falhas de preenchimento dos pixels, ocorridas no processamento das imagens. Após a verificação, o MDT foi recortado apenas para o limite da localização da área de estudo e posteriormente classificado em classes com para melhor visualização.

O mesmo procedimento foi utilizado para gerar o MDT com base nas imagens capturadas pelo veículo aéreo tripulado. A imagem de satélite adquirida com os dados do MDE, para ser trabalhada como MDT foi obtida de forma gratuita do Alasca Satellite Facility (<https://search.asf.alaska.edu/#/>) do satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite).

O satélite ALOS foi lançado em 2006 pela Agência de Exploração Aeroespacial do Japão (JAXA) e de acordo com Sena et al., (2020) estava equipado com dois instrumentos, sendo um deles o radar polarimétrico de abertura sintética de banda larga (PALSAR) que opera na banda L e é capaz de fazer captura de imagens diurnas ou noturnas em quaisquer condições climáticas. Ainda segundo os autores, os produtos MDE que foram criados com PALSAR tiveram sua geometria e radiometria corrigidas gerando MDE com resolução de 12,5m.

Após adquirir a imagem de satélite, foram realizadas as verificações de possíveis erros, onde verificou-se inicialmente a existência de valores negativos de altitude. Posteriormente verificou-se a ocorrência de pixels com anomalias de altitude, sejam eles abaixo ou acima dos valores padrões dos vizinhos mais próximos (BENEDITTI, 2010).

Realizadas as correções o MDE da imagem de satélite foi recortado para o limite da localização da área de estudo e em seguida classificado em classes com intervalos iguais para melhor visualização. Destaca-se que o MDE representa a altitude acima do nível do mar contando os objetos. Para esse estudo a sua base é tida como um MDT na localização do ILPF, ao passo que na data de aquisição da imagem pelo satélite (2010), havia apenas pastagem na área em que hoje se encontra o sistema integrado.

Para produzir o MDT com base nas altitudes obtidas com GPS Geodésico, os valores foram transferidos de uma planilha digital para um ambiente SIG no software QGIS, ao passo que os dados também continham as coordenadas geográficas de cada ponto de altitude. O GPS Geodésico foi configurado para capturar dados com distâncias a cada um metro. Em seguida, os dados foram convertidos para shapefile. Com o dado shapefile para gerar o MDT utilizou-se o interpolador por IDW (LI e HEAP, 2011), em que se cria polígonos baseados nos pontos amostrais, sendo que cada um desses pontos apresenta um polígono de influência (MIRANDA et al., 2018).

Posteriormente, realizadas as correções, o MDT foi recortado para o limite da localização da área de estudo. Com todos os MDT prontos, deu-se início ao processo de extrair os valores de altitude dos modelos para tabelas. Para tanto, criou-se uma malha de pontos padronizada para realizar a amostragem das altitudes (LIMA et al., 2019; LAURENTTI et al., 2019). A mesma malha foi utilizada em todos os modelos digitais, com o intuito de extrair informações da mesma localidade em cada MDT.

Para analisar os resultados as estatísticas descritivas dos MDT foram tabuladas. foi gerado um gráfico de caixa contendo as informações de altitude de cada MDT para análise exploratória dos dados, com o intuito de verificar as variações de altitude entre cada modelo digital. Também foi gerado um gráfico de linhas com as altitudes de cada MDT para verificar se os valores se acompanham nas mesmas localizações geográficas da área de estudo.

4.4 Declividade

Os mapas de declividade, que representam a inclinação da superfície do terreno, do sistema integrado, foram gerados com base no MDT obtido após o processamento das imagens capturadas com drone e no MDT gerado com base nos pontos de altitude coletados em campo com GPS Geodésico. Cada mapa foi gerado com a mesma metodologia, utilizando as análises de arquivo no formato raster presentes nas ferramentas do software QGIS.

Os mapas foram configurados em porcentagem, com base nos arquivos dos MDT antes dos recortes para a área de estudo, a fim de que as bordas no limite da área não sofressem

distorções. As classes de declividade foram classificadas de 0-6 (%) (muito fraca) que representam áreas em que o relevo é plano; 6-12 (%) (fraca) a qual compreendem regiões em que o relevo é plano ou ligeiramente convexizado; 12-20 % (média) em que a característica do relevo é convexa de pequena dimensão interfluvial (ROSS, 1994).

4.5 Modelo Digital de Altura

Os MDE gerados foram exportados para o software QGIS, onde se utilizou a ferramenta calculadora raster, para subtrair o MDT do MDS, gerando o MDA. Em seguida, no QGIS, os modelos foram recortados apenas para a área de estudo. O MDA gerado contém as informações dos dados que são pertencentes apenas aos objetos, no caso a vegetação, uma vez que os dados referentes ao solo foram removidos (PEREIRA, 2014). Posteriormente, ainda no software QGIS, foi aplicada uma ferramenta de reamostragem para agregar os pixels do MDA, com base nos valores máximos, afim de que os pontos a serem extraído de fato coletassem as informações dos pontos mais altos das árvores (VAN IERSEL et al., 2018).

Esses dados de altura estimados foram correlacionados com as alturas das árvores aferidas em campo, ao passo que os valores foram extraídos do MDA com base na localização geográfica das árvores que foram medidas com clinômetro. Foram geradas as estatísticas descritivas para cada conjunto de dados de altura, bem como o Coeficiente de Correlação de Pearson, que segundo Santos (2017), mediu a associação existente entre as variáveis, cuja interpretação segue a Tabela 2.

Tabela 2. Interpretação do Coeficiente de Correlação de Pearson

Coeficiente de correlação	Correlação
$r = 1$	Perfeita positiva
$0,8 < r < 1$	Forte Positiva
$0,5 < r < 0,8$	Moderada positiva
$0,1 < r < 0,5$	Fraca positiva
$0 < r < 0,1$	Íntima positiva
$r = 0$	Nula
$-0,1 < r < 0$	Íntima Negativa
$-0,5 < r < -0,1$	Fraca Negativa
$-0,8 < r < -0,5$	Moderada Negativa
$-1 < r < -0,8$	Forte Negativa
$r = -1$	Perfeita Negativa

Fonte: SANTOS, 2017

4.6 Interpolação dos dados de altura

O MDA apresentou algumas áreas com valores de altura que não foram estimados, ou seja, que apresentaram espaços vazios devido à baixa sobreposição de imagens e pouca correspondência de pontos comuns. Essas alturas de árvores foram estimadas por meio de técnicas de geoestatística.

Foi criado um ponto geográfico em cima da localização de cada árvore no sistema integrado, com base no ortomosaico, gerado após o processamento das imagens. Posteriormente, com a localização dos pontos geográficos em cima de cada árvore, foram extraídos os dados de altura do MDA, utilizando uma ferramenta no QGIS para extrair valores das alturas das árvores para os pontos criados. Essa base de informações foi utilizada para interpolar os dados utilizando a Krigagem Ordinária.

Destaca-se para essa técnica que um número maior de pontos medidos resultará em uma superfície mais lisa (FISHER; LEWIS; EMBLETON et al., 1987), porém necessitará de um custo computacional maior (CHAPLOT et al., 2006). A Krigagem Ordinária, segundo Chaplot et al (2006), leva em consideração a distância e o grau de variação entre pontos de dados conhecidos, sendo que considera então as correlações entre os pontos de dados para determinar o valor estimado em um ponto desconhecido.

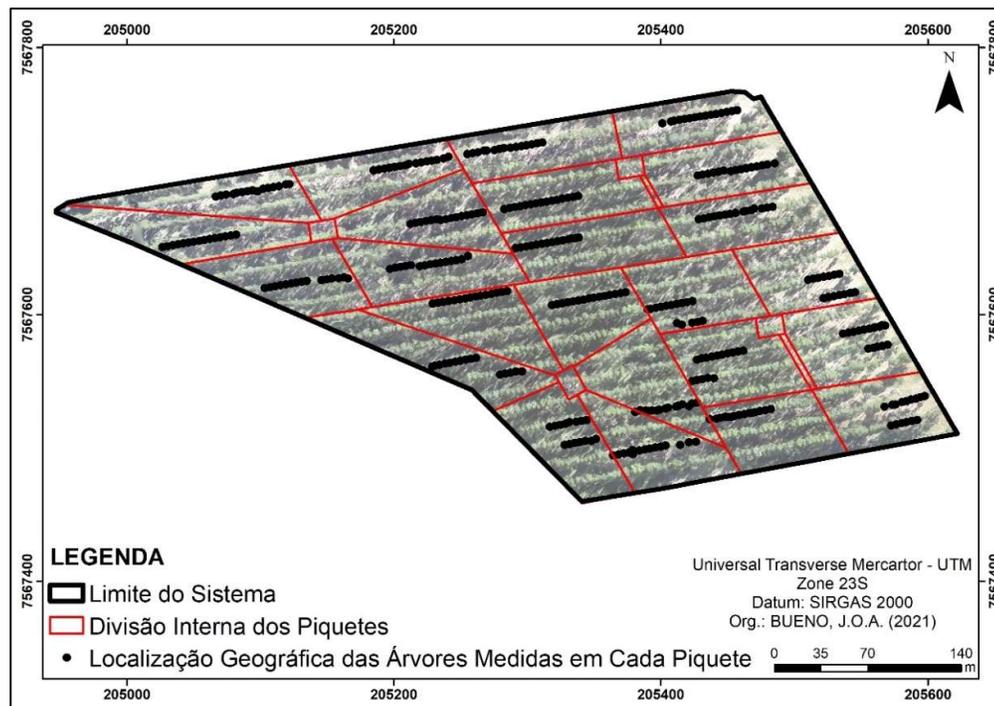
A vantagem de se utilizar a Krigagem é que ela permite que se faça uma validação cruzada dos dados a fim de checar a qualidade do modelo de ajuste e da interpolação (SANTOS, 2017). Assim, a Krigagem e o modelo do semivariograma foram estimados utilizando o software Vesper (OLIVERIRA; GREGO; BRANDAO, 2015). A malha raster da Krigagem, em formato .asc, foi exportada para o software QGIS onde foi recortada para a área de estudo.

Mitas e Mitasova (1999) descrevem em detalhes os procedimentos utilizados e a equação para realização dos cálculos da abordagem geoestatística por meio da Krigagem Ordinária. As alturas dos locais das 360 árvores, medidas em campo, foram extraídos do MDA interpolado, e os valores foram correlacionados com os dados de altura das 360 árvores medidas com o clinômetro.

5 RESULTADOS

Foram realizadas medidas de altura em 15 árvores por piquete experimental, em um total de 24 piquetes, perfazendo um número de 360 árvores medidas. Cada piquete tem 83 árvores, as medidas representaram 18% de toda área de estudo. A Figura 6 representa a área de estudo com a divisão interna dos piquetes bem como a localização geográfica de cada eucalipto medido em campo.

Figura 6. Localização geográfica das árvores

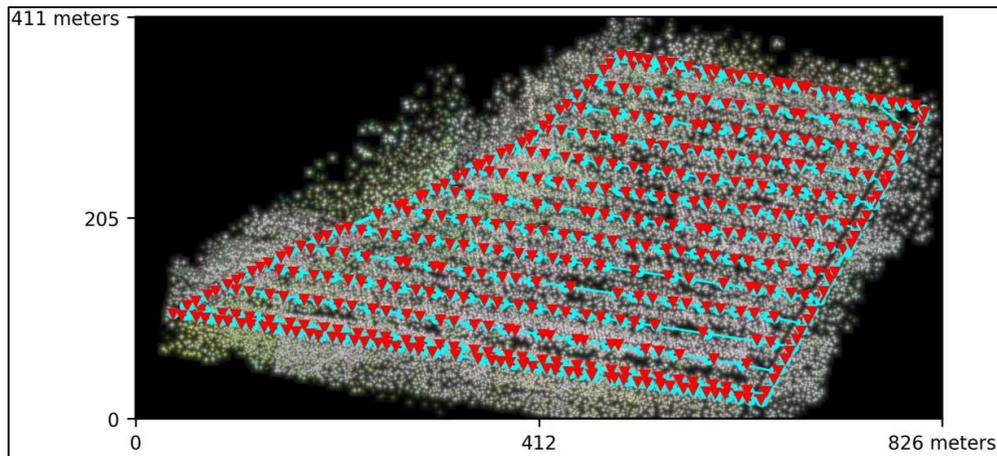


Fonte: Elaborado pelo autor

Imagens Aéreas

Após o voo aéreo realizado com o drone, foram capturadas um total de 474 imagens. A nuvem tridimensional de pontos, gerada após o processamento das imagens pelo software, apresentou um total de 44.124, 726 pontos com um GSD de 1,4cm e área coberta de 0,27 km². O percurso de voo realizado pelo drone capturou imagens em treze linhas paralelas nas regiões centrais da área de estudo e posteriormente, durante o mesmo levantamento, com um voo lateral (orbital), capturou imagens apenas nas regiões das bordas, para melhorar o desempenho dos modelos tridimensionais (Figura 7).

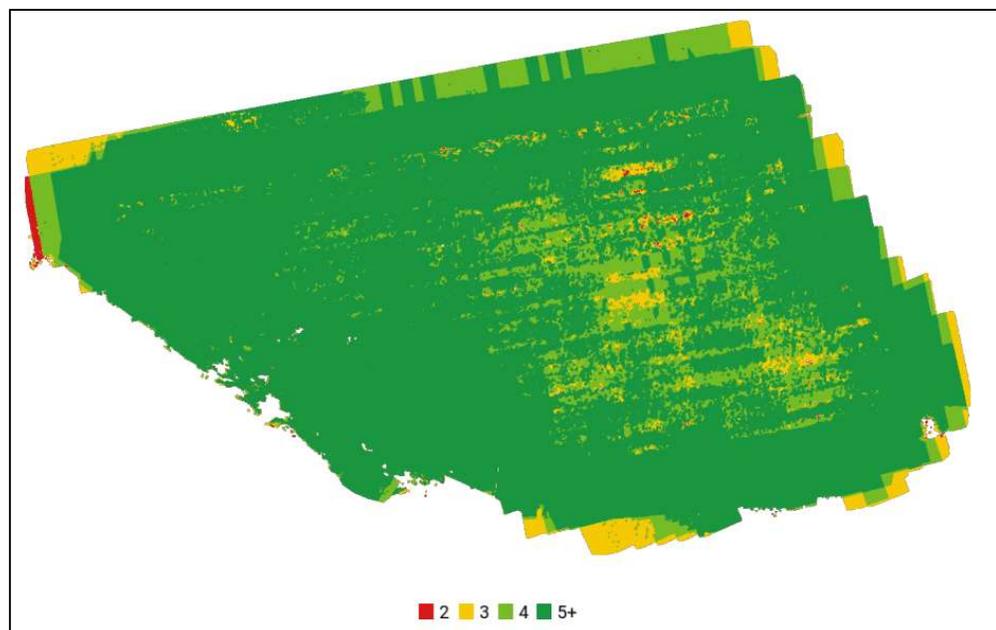
Figura 7. Percurso de voo realizado com drone, os triângulos representam o momento em que as imagens foram capturadas



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 8, pode se observar a quantidade de sobreposição de imagens, utilizadas no processamento, para gerar a ortofoto e os modelos digitais. Nota-se que as regiões mais próximas ao centro da área apresentaram menos sobreposição, variando de três a quatro imagens sobrepostas e em algumas poucas regiões com até duas sobreposições. A baixa quantidade de sobreposições de imagens, encontradas na região central, foi um dos fatores que contribuíram para o baixo desempenho nessas mesmas áreas dentro do MDA.

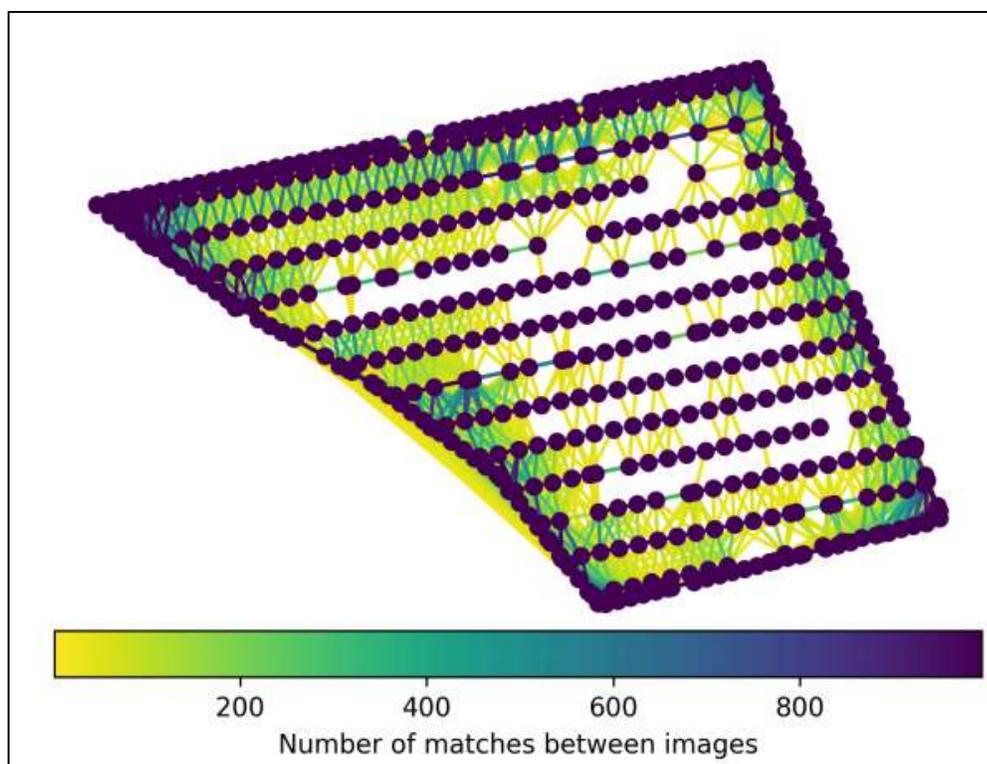
Figura 8. Sobreposição das imagens capturadas com drone, os números indicam a quantidade de imagens sobrepostas



Fonte. Elaborado pelo autor

Na Figura 9 encontram-se os detalhes do percurso de voo efetuado pelo drone, porém com as informações referentes ao número de pontos correspondentes entre as imagens. Nota-se que assim como na Figura 8, as regiões centrais da área apresentaram menores correspondências entre pontos considerados com as mesmas características. O mesmo padrão da Figura 8 também foi encontrado nas regiões de bordas, onde se encontram as maiores correspondências entre pontos. Essa baixa correspondência entre os pontos localizados nas regiões mais centrais da área, assim como a baixa sobreposição de imagens, também foi um fator limitante para a qualidade do MDA.

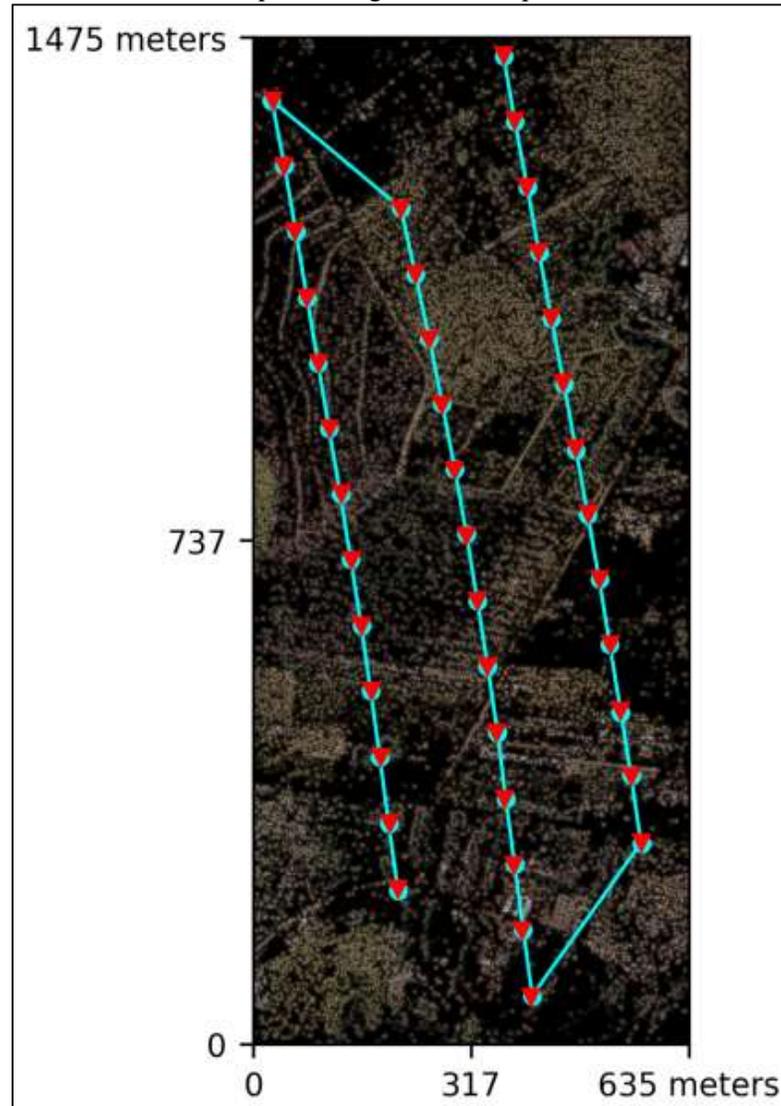
Figura 9. Número de pontos correspondentes no percurso entre as imagens capturadas com drone



Fonte: Elaborado pelo autor

O voo realizado pelo veículo aéreo tripulado da Airscout®, capturou um total de 39 imagens. A nuvem tridimensional de pontos, gerada após o processamento das imagens pelo software, apresentou um total de 8.743.869 pontos, 35.380.857 a menos que a nuvem de pontos geradas após o processamento das imagens capturadas com drone. O GSD foi de 12cm e a área coberta de 0,74km. O percurso de voo realizado pelo veículo aéreo tripulado capturou imagens em três linhas apenas (Figura 10), 10 linhas a menos que o voo do drone. Destaca-se que para esse levantamento não foi realizado voo lateral (orbital).

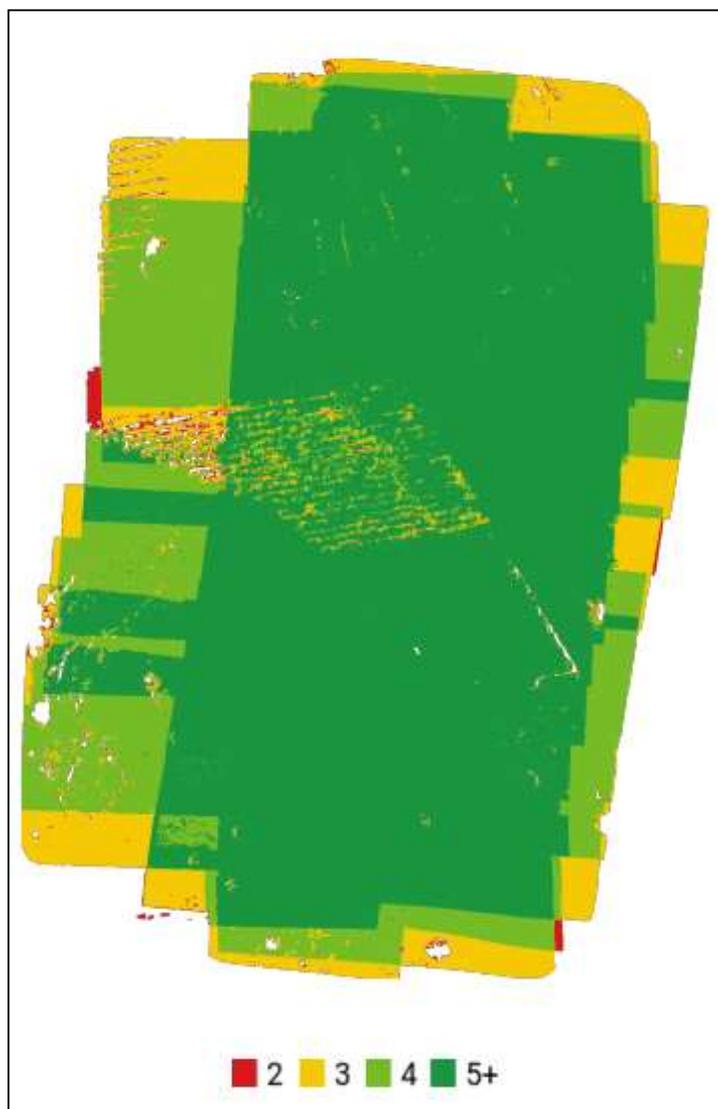
Figura 10. Percurso de voo realizado com o veículo aéreo tripulado, os triângulos representam o momento em que as imagens foram capturadas



Fonte: Elaborado pelo autor

A quantidade de sobreposição das imagens para o levantamento realizado com o veículo aéreo tripulado (Figura 11) seguiu o mesmo padrão do voo com o drone, em que as regiões centrais apresentaram menores sobreposições de imagens, enquanto nas áreas seguindo do centro em direção às bordas, maiores com exceção da região a oeste onde se encontram também sobreposições menores entre as imagens.

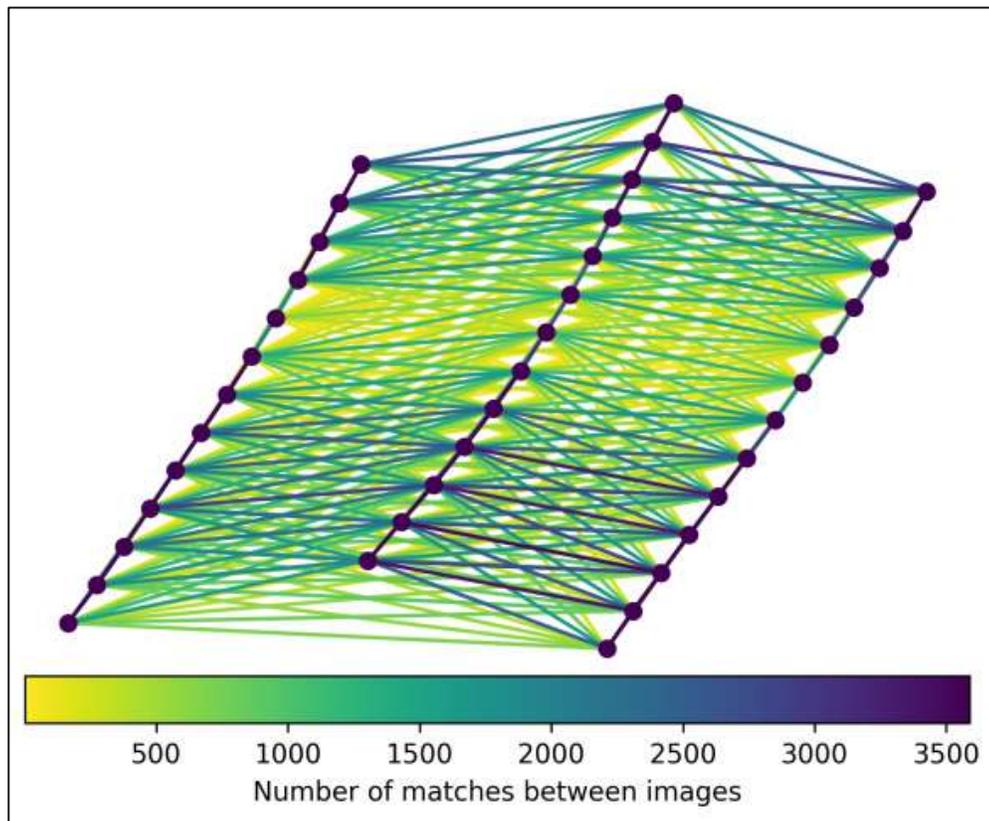
Figura 11. Sobreposição das imagens capturadas com veículo aéreo tripulado



Fonte: Elaborado pelo autor

O percurso do voo realizado pelo veículo aéreo tripulado com as respectivas correspondências dos pontos em comum entre as imagens pode ser visualizado na Figura 12.

Figura 12. Número de pontos correspondentes no percurso entre as imagens capturadas com veículo aéreo tripulado



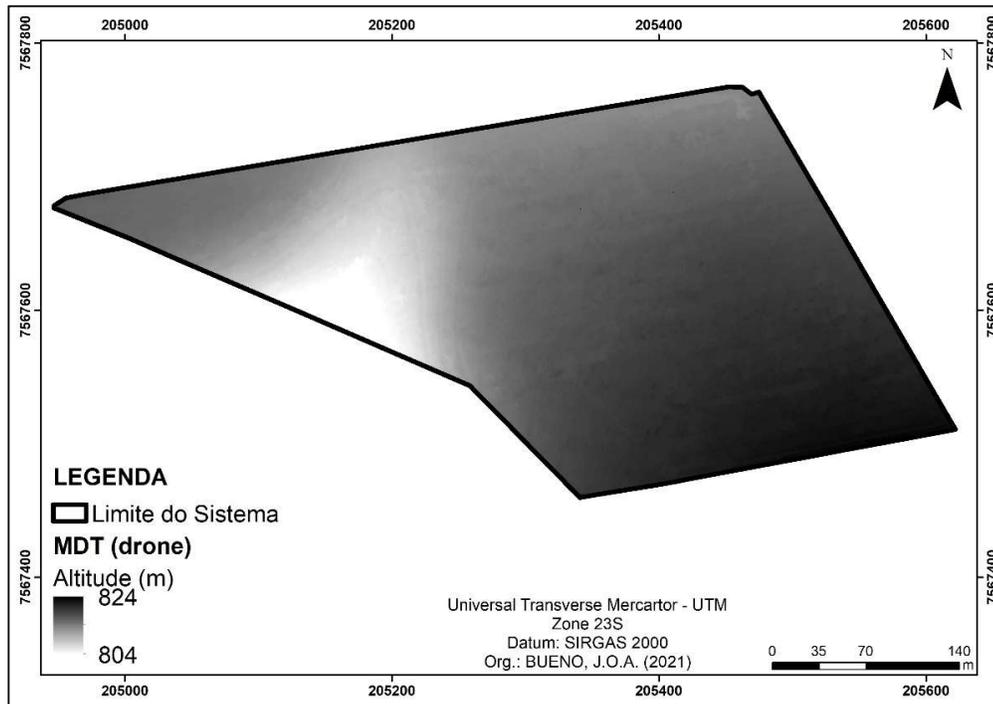
Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que as regiões centrais da Figura 12 apresentaram as menores sobreposições, porém destaca-se que o número máximo de pontos correspondentes em comum entre as imagens foi maior em relação ao levantamento aéreo realizado pelo drone, com uma diferença máxima de 2700 correspondências.

Modelos Digitais de Terreno

Os mapas dos Modelos Digitais de Terreno elaborados com base nas imagens e nos pontos cotados com GPS geodésico apresentaram valores de intervalos de altitudes diferentes entre si, sendo que o MDT elaborado com base nas imagens aéreas capturadas com o voo realizado pelo drone apresentou valores que variam de 804m a 824m de altitude (Figura 13).

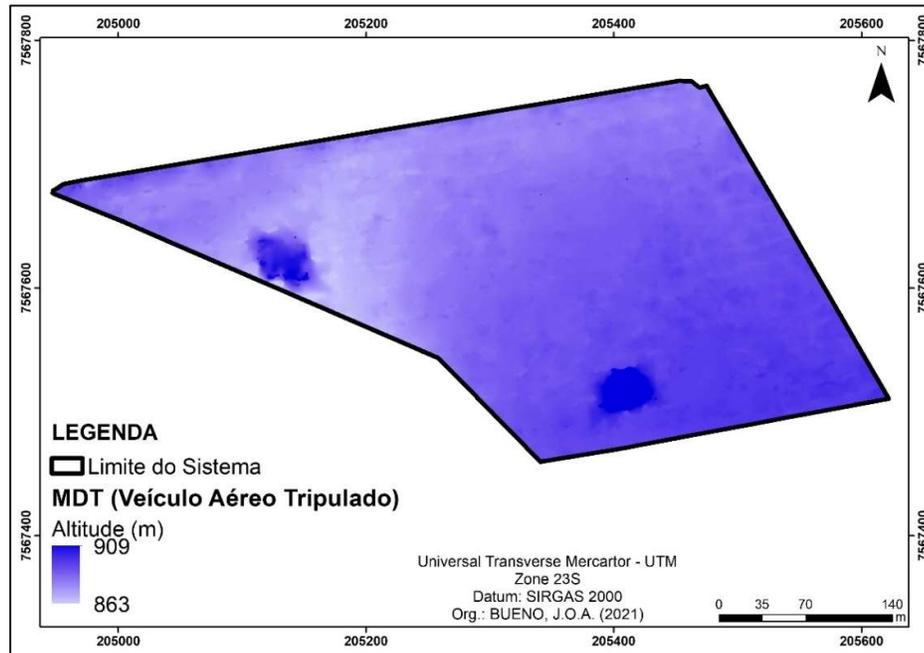
Figura 13. Modelo Digital de Terreno (drone)



Fonte: Elaborado pelo autor

O mapa do MDT produzido com base nas imagens aéreas capturadas pelo veículo aéreo tripulado (Figura 14) apresentou valores que variam de 863m a 909m de altitude, observa-se que na região mais a oeste do mapa, houve uma leve distorção dos dados, bem como locais na região sul, apresentando valores discrepantes com relação a mesma área nos demais MDT, fato que contribuiu para ser o modelo digital que apresentou o maior intervalo de variação, o que pode ter sido resultado da baixa sobreposição de imagens nessa região durante o processamento, conforme indica a Figura 11.

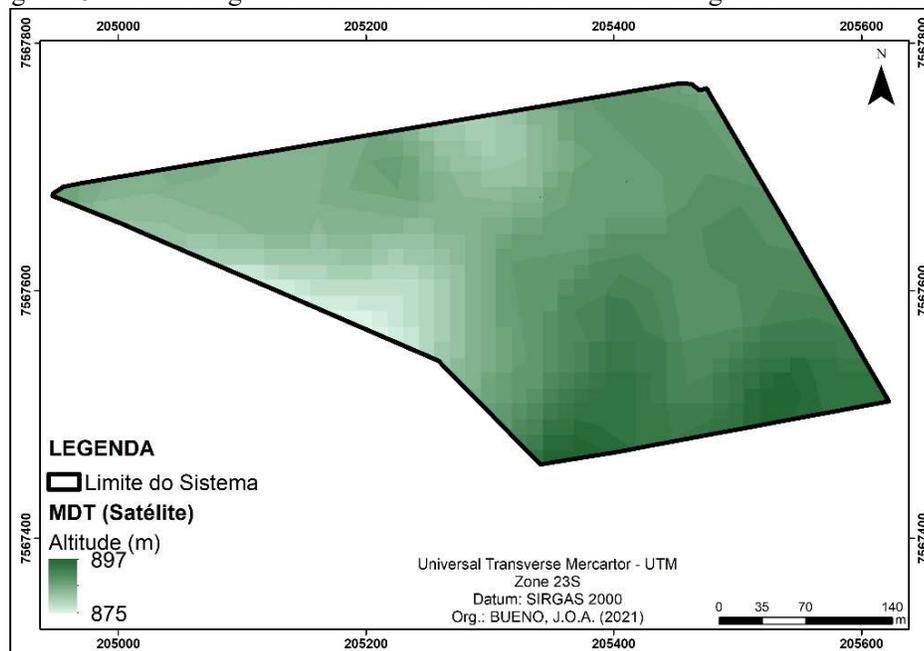
Figura 14. Modelo Digital de Terreno (veículo aéreo tripulado)



Fonte: Elaborado pelo autor

Com relação a análise visual dos mapas, o MDT elaborado com base na imagem obtida do Satélite ALOS (Figura 15) foi o que apresentou um detalhamento menos suave, ao passo que a sua resolução é mais baixa que as dos demais modelos digitais.

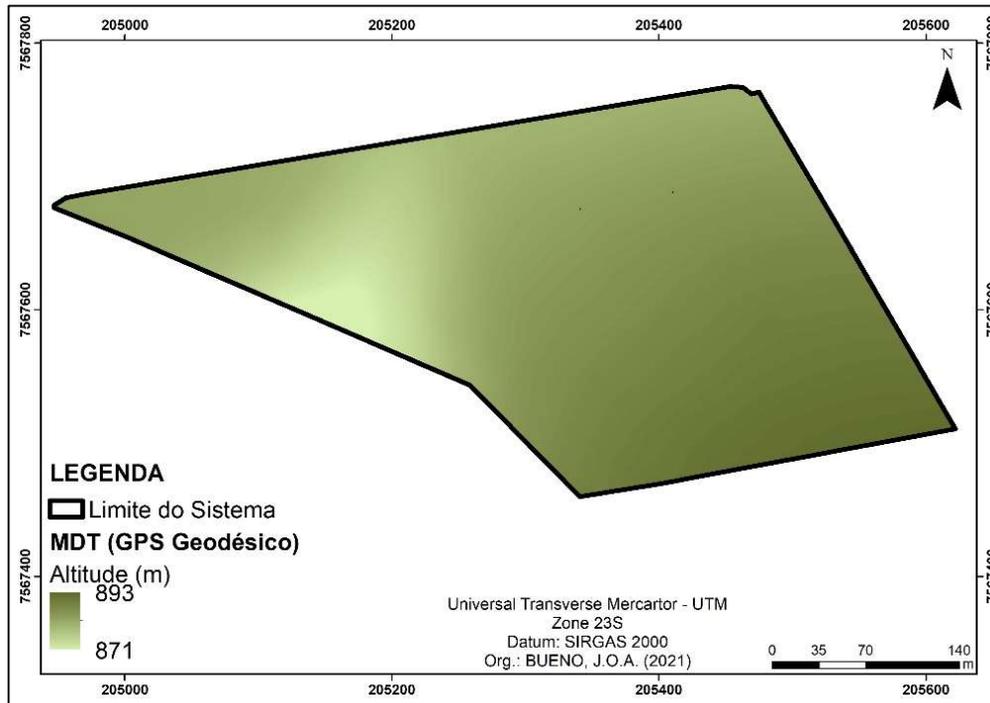
Figura 15. Modelo Digital de Terreno elaborado com base na imagem do satélite ALOS



Fonte: Elaborado pelo autor

Já o MDT elaborado com base nos pontos cotados por GPS Geodésico apresentou uma visualização de classes mais suavizada (Figura 16). Os valores de altitude encontrados variaram de 871m a 893m.

Figura 16. Modelo Digital de Terreno elaborado com base nos pontos de altitude do GPS geodésico

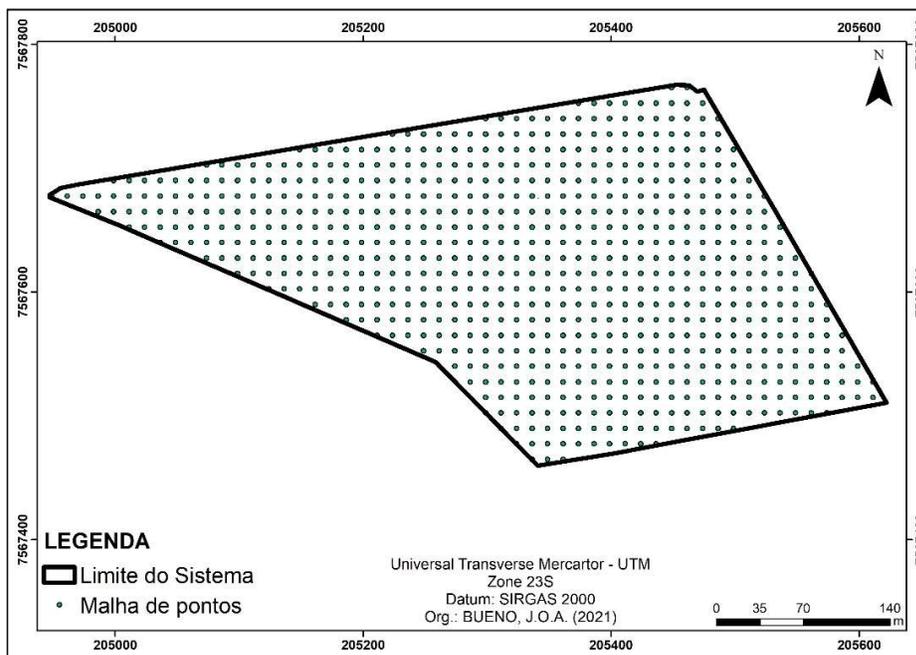


Fonte: Elaborado pelo autor

Os mapas mostram que visualmente as classes de altitudes variam entre os mapas. No entanto, nota-se um aumento de altitude que segue o mesmo padrão para ambos, independente da fonte de dados utilizada para elaborar os MDT, sendo menores na região oeste e aumentando em direção a região sudeste e sul.

Destaca-se que após a geração dos MDT foram observados os seguintes GSD para cada modelo digital: o do drone (5,4cm); veículo aéreo tripulado (48 cm); Satélite ALOS (12,5m) e GPS geodésico (1m), indicando um melhor detalhamento, em termos de resolução, para o MDT gerado com base nas imagens capturadas pelo drone. Na Figura 17 pode-se observar a disposição geográfica dos 700 pontos criados com o intuito de extrair as informações de altitude dos mesmos locais de cada MDT, a fim de gerar as estatísticas descritivas e os gráficos, de caixa e de linhas.

Figura 17. Malha com 700 pontos, gerada para extrair as informações de altitude nos mesmos locais de cada MDT



Fonte: Elaborado pelo autor

Com a localização geográfica dos 700 pontos e os valores de altitude extraídos dos MDT foram elaboradas as estatísticas descritivas dos dados (Tabela 3). Por meio dos valores mínimo e máximo de altitude, pode-se observar que o intervalo que mais varia dos demais é o do MDT das imagens do veículo aéreo tripulado, apresentando uma variação de 46m enquanto os demais apresentam intervalos de altitude de 20 a 21m.

Tabela 3. Estatística descritiva das altitudes referentes aos MDT

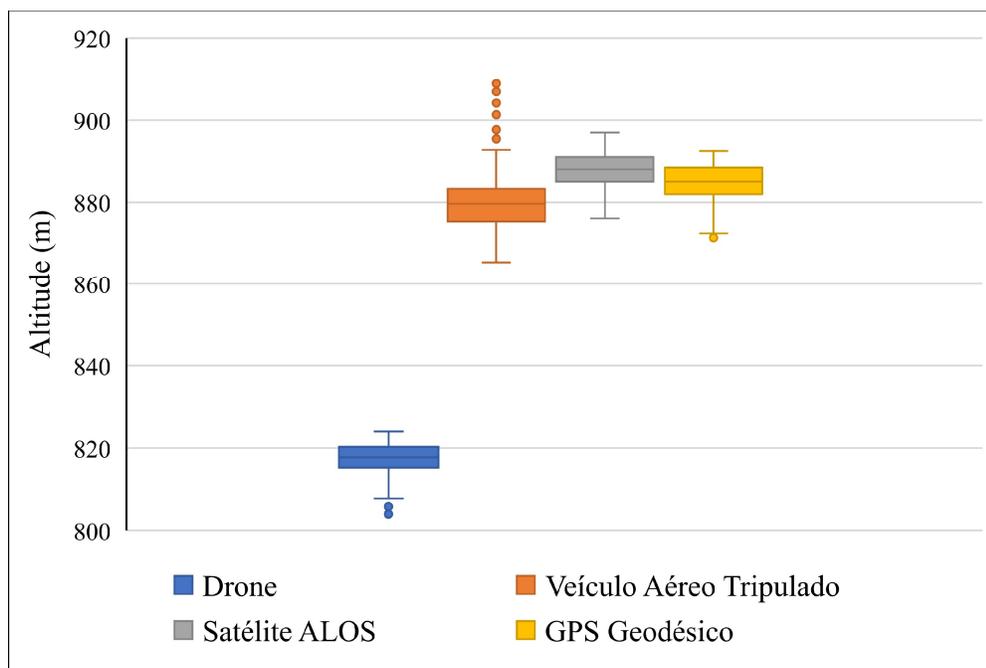
Altitude (m) Modelos Digitais de Terreno				
Parâmetros Estatísticos	Drone	Veículo Aéreo Tripulado	Satélite ALOS	GPS Geodésico
Média	817,26	879,24	887,97	884,66
Desvio Padrão	4,037	5,684	4,487	4,666
Mínimo	804	863	876	871
Máximo	824	909	897	892
CV (%)	0,49	0,64	0,50	0,52
Curtose	0,481	1,963	0,416	0,333
Assimetria	0,891	0,422	0,217	0,504
N	700	700	700	700

Em que: $CV (\%) = (\text{Desvio Padrão}/\text{Média}) \cdot 100$

Fonte: Elaborado pelo autor

Os MDT apresentam valores de curtose e assimetria que se encaixam no intervalo de 0 a 3, o que segundo (CARVALHO; SILVEIRA; VIEIRA, 2002) para esses valores teóricos os conjuntos de dados são considerados normais. Na Figura 18, o gráfico de caixa mostra que os intervalos de altitude dos MDT, gerados pelas quatro diferentes fontes de dados, variam entre si, sendo os que mais se aproximam são os do satélite ALOS, veículo aéreo tripulado e o do GPS Geodésico.

Figura 18. Gráfico de Caixas com as altitudes (m) dos MDT

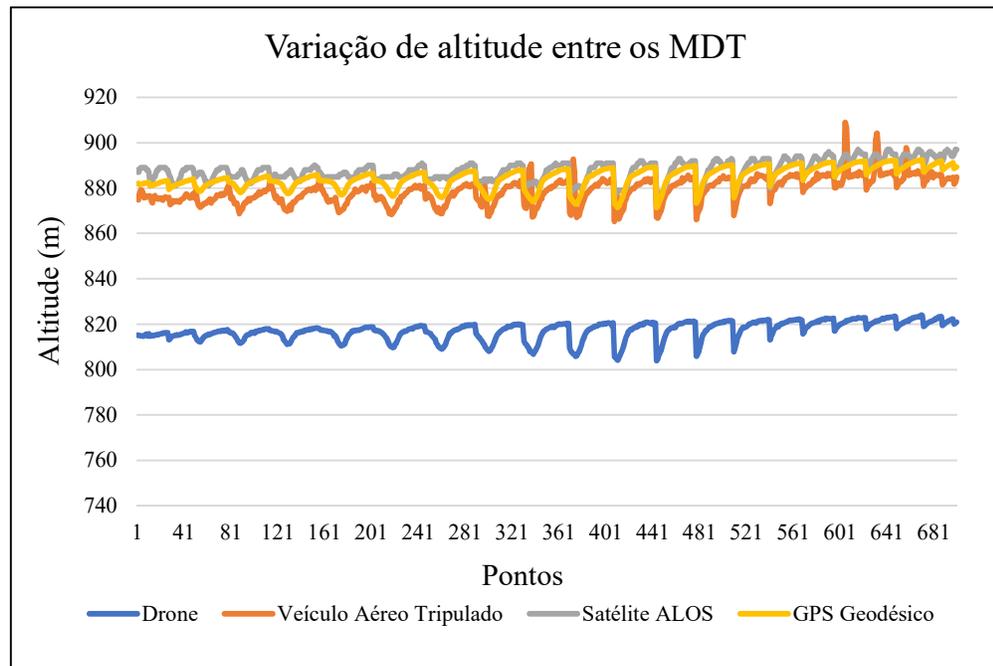


Pontos acima e abaixo dos gráficos de caixa são considerados outliers

Fonte: Elaborado pelo autor

Para detalhar as variações de altitude ao longo de cada ponto extraído, com base na localização geográfica idêntica em cada MDT, gerou-se um gráfico de linhas que pode ser observado na Figura 19. Vale destacar novamente a variação de altitude, do MDT gerado pelo processamento das imagens capturadas pelo veículo aéreo tripulado, que mais varia das demais, na região dos pontos que vão de 601 a 641. Pontos estes que são considerados outliers, pois são valores atípicos que fogem da normalidade, conforme se observa na Figura 18.

Figura 19. Gráfico de linhas representando as variações de altitudes dos MDT



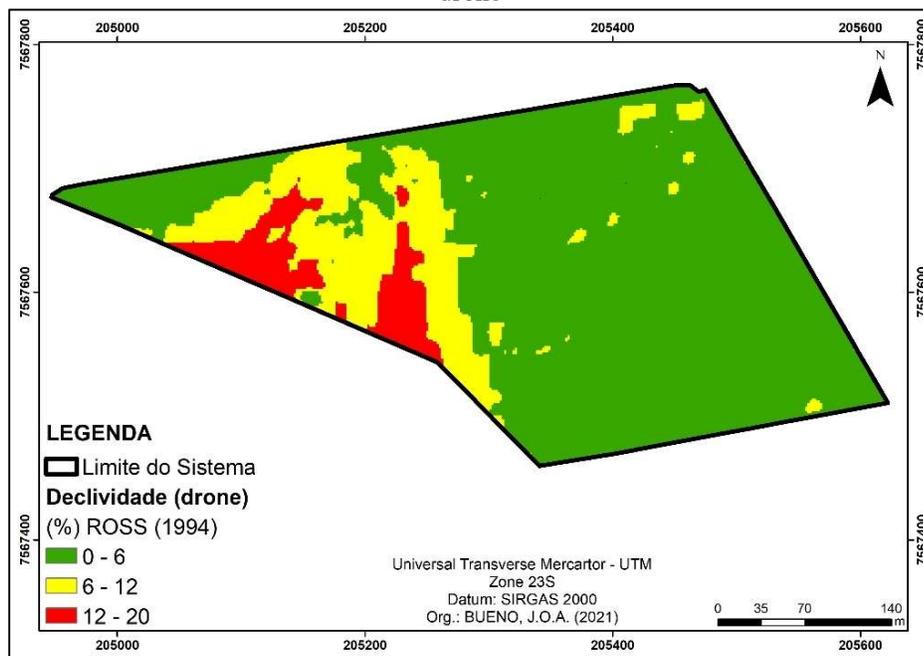
Fonte: Elaborado pelo autor

Por meio desse gráfico, pode-se observar, analisando as linhas de variação de altitude de cada MDT, que todas as altitudes, mesmo sendo diferentes, se acompanham, ou seja, valores de altitudes mais altos são maiores em todos os MDT enquanto que os mais baixos também são menores entre eles. Independente dessas variações de altitudes, o MDA gerado nessa dissertação, não tem as alturas das árvores afetadas por essa diferença de altitude em relação ao nível do mar, sendo que os valores que interessam são os da diferença entre o MDT e o MDS.

Declividade

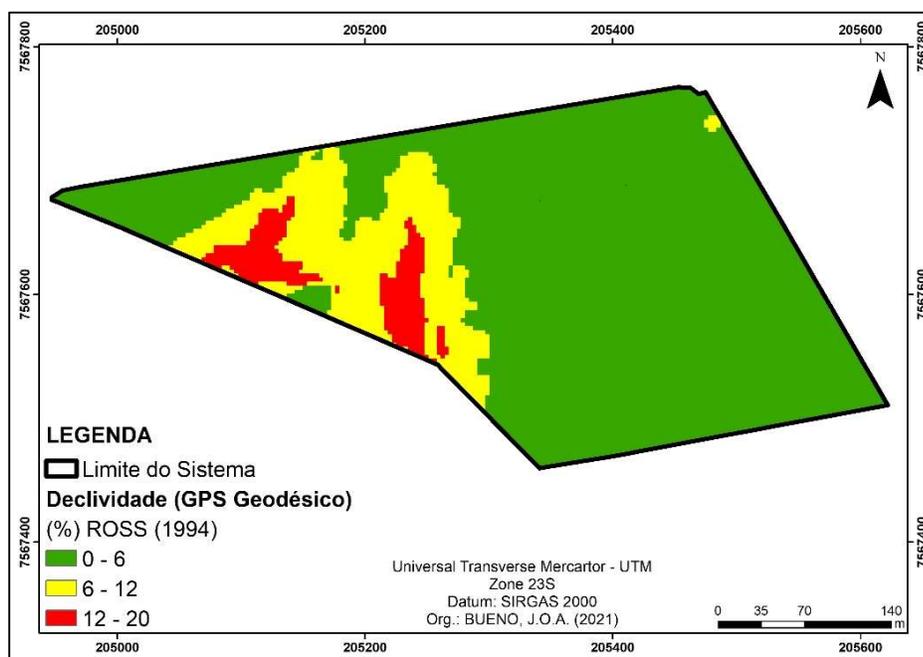
Para analisar o quanto as altitudes maiores e menores se acompanham na área de estudo, foram gerados mapas de declividade, em porcentagem, com base nas altitudes dos MDT gerados das fontes do drone e do GPS geodésico. A análise da declividade do sistema integrado detalha que a área em que está localizado o ILPF é uma área com baixo declive, o que se observa em ambos os mapas, tanto o gerado por meio do MDT obtido com o processamento das imagens do drone (Figura 20), quanto o elaborado por meio do MDT gerado pelo processamento das altitudes obtidas com GPS geodésico (Figura 21).

Figura 20. Mapa de declividade da área de estudo feito com base nas imagens aéreas capturadas pelo drone



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 21. Mapa de declividade da área de estudo feito com base nos pontos de altitude coletados com GPS Geodésico



Fonte: Elaborado pelo autor

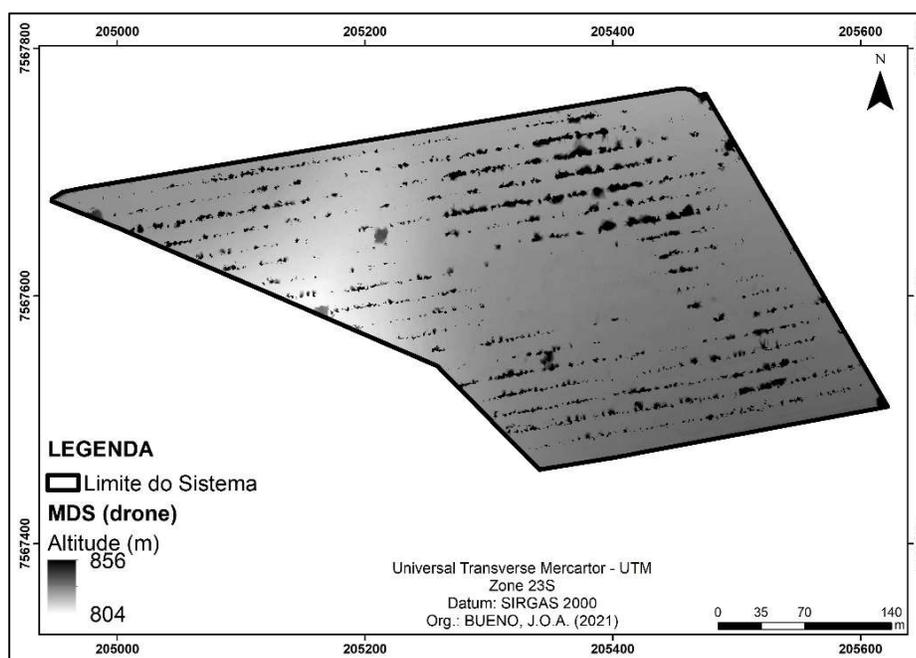
Nota-se que a classe de declividade que varia de 0 a 6 (%) é a mais representativa da área, enquanto as classes de 6 a 12% e de 12 a 20 (%) são menos abundantes, ficando restritas apenas às áreas mais a oeste do ILPF.

O mapa de declividade gerado em porcentagem serve de auxílio para corroborar o fato de que, independente das diferenças de altitudes encontradas entre as mínimas e máximas dos MDT, gerados pelas 2 fontes de dados, as variações do terreno se assemelham conforme visto no gráfico de linhas da Figura 19. Novamente corroborando a análise de que as altitudes, com as variações do relevo mesmo sendo diferentes em termos numéricos, entre os modelos digitais, se acompanham ao longo da área de estudo, garantindo a utilização do MDT para gerar o MDA sem que haja interferência nos dados de altura das árvores.

Modelo Digital de Altura

Após o processamento das imagens obtidas pelo drone, gerou-se os MDT e MDS com resolução de 5,4 cm por pixel. O MDT (Figura 13) variou entre alturas de 804m até 824m, enquanto que o MDS (Figura 22) variou de 804 a 856m.

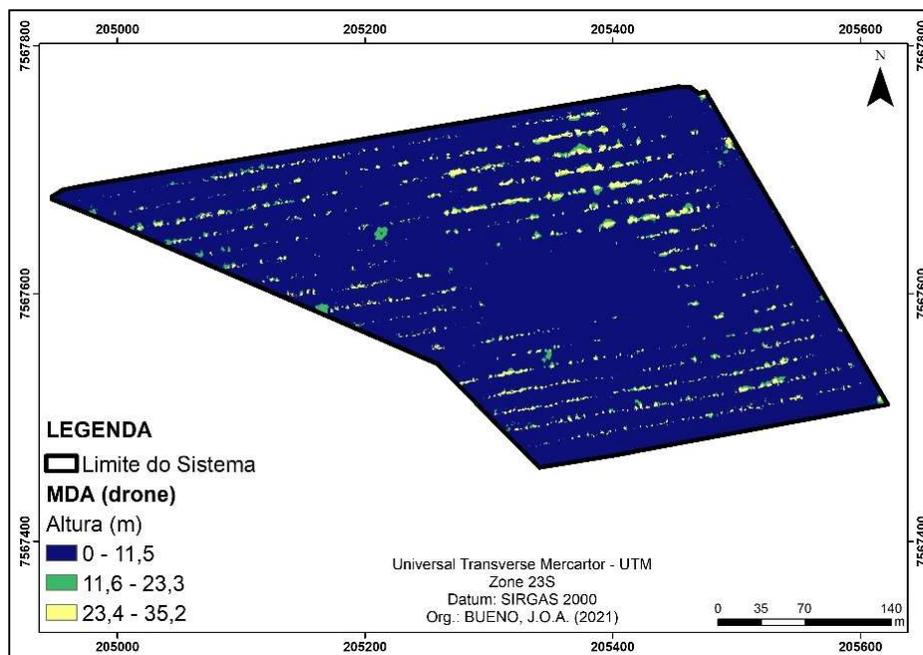
Figura 22. MDS elaborado com base nas imagens capturadas pelo drone



Fonte: Elaborado pelo autor

Considerando que a área do limite do sistema integrado não apresentava nenhuma outra feição acima da superfície do terreno, além dos eucaliptos, subtraindo o MDT do MDS, o MDA gerado apresenta apenas as alturas dos eucaliptos, conforme pode se observar na Figura 23.

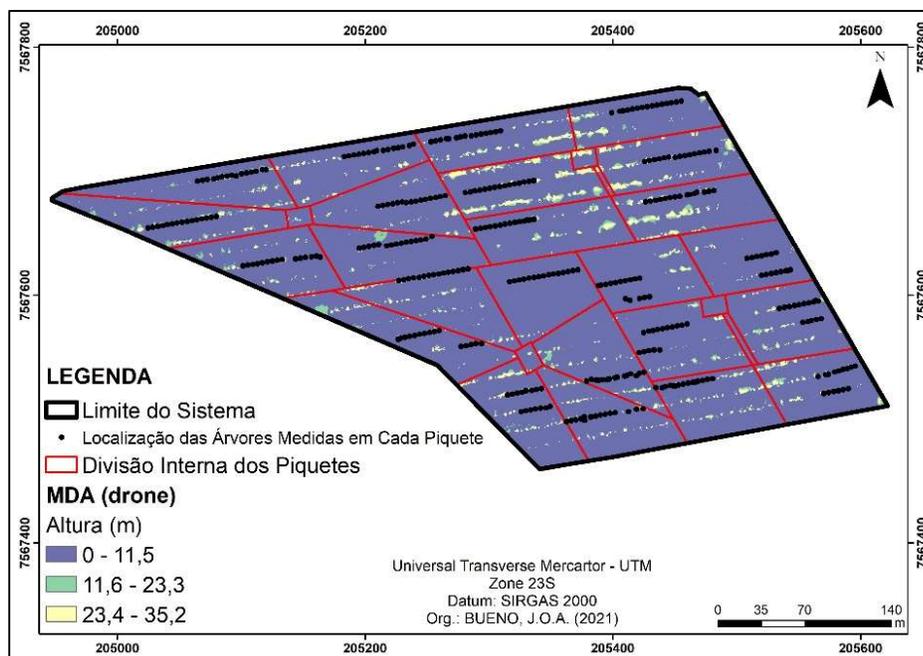
Figura 23. Modelo Digital de Altura



Fonte: Elaborado pelo autor

Com base no MDA, foram extraídos os valores de altura das árvores utilizando a localização geográfica dos 360 eucaliptos que foram medidos em campo com clinômetro (Figura 24).

Figura 24. Localização geográfica das árvores que foram medidas com clinômetro



Fonte: Elaborado pelo autor

Foram comparadas 188 árvores, entre as medidas em campo e as que apresentaram resultados estimados no MDA. As árvores que não apresentaram resultados de altura, estimadas no MDA, foram descartadas, ficando apenas as que tinham medidas em campo e estimadas, para a mesma localização geográfica.

Os valores das alturas das árvores que foram extraídos do MDA, de maneira pontual, foram analisados por meio das estatísticas descritivas das alturas (Tabela 4), e do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). As médias apresentaram diferença de 0,9m. Os valores indicam que os dados de altura obtidos com clinômetro variaram mais do que as alturas estimadas pelo MDA. Sendo que a diferença entre os valores mínimos foi de -0,6m e entre os máximos de 1,3m.

Tabela 4. Estatística descritiva dos dados de altura medidos em campo e estimados pelo MDA

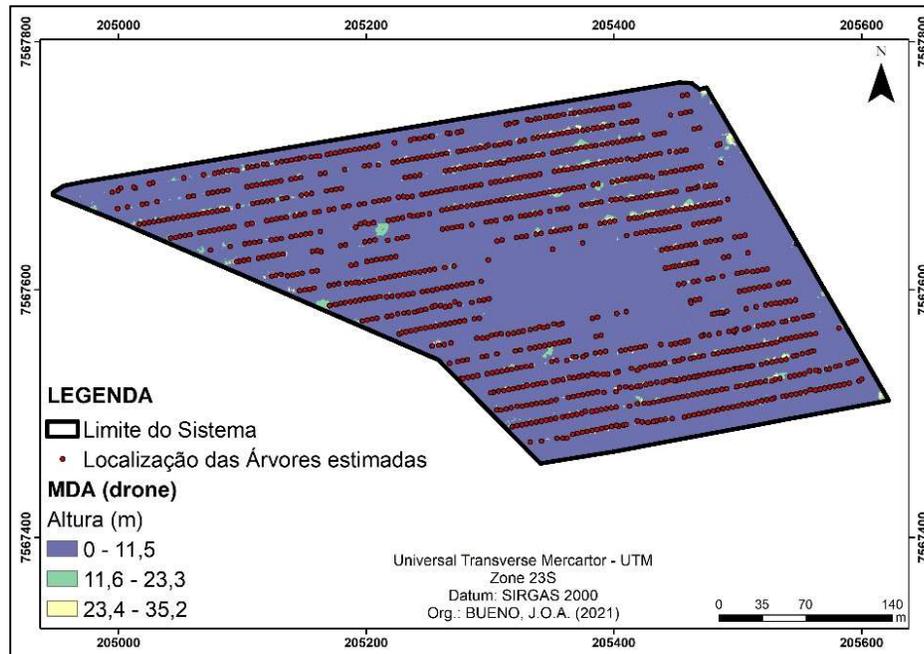
Parâmetros Estatísticos	Clinômetro	MDA
Média	30.3	29.4
Desvio P.	2.580	1.990
Curtose	-0.556	-0.617
Assimetria	-0.442	-0.365
Mínimo	23.8	24.4
Máximo	34.7	33.4
N	188	

Fonte: Elaborado pelo autor

O valor do Coeficiente de Correlação de Pearson (r), entre as alturas aferidas com clinômetro e estimadas pelo MDA, foi de 0,58 indicando uma correlação moderada positiva entre as medidas. Nota-se nas regiões centrais do mapa (Figura 23), locais vazios e sem árvores, essas regiões são locais em que houveram baixa correspondência entre os pontos comuns e baixa sobreposição de imagens, durante o processamento. Como alternativa para preencher esses espaços vazios, que não apresentaram medidas, utilizou-se um interpolador geoestatístico (Krigagem Ordinária).

Para realizar a krigagem, foi utilizado como base, para extrair as alturas das árvores, os pontos referentes às localizações geográficas dos eucaliptos da área total de estudo. Foram encontradas 1099 árvores com alturas estimadas em toda a área do sistema, pelo MDA (Figura 25).

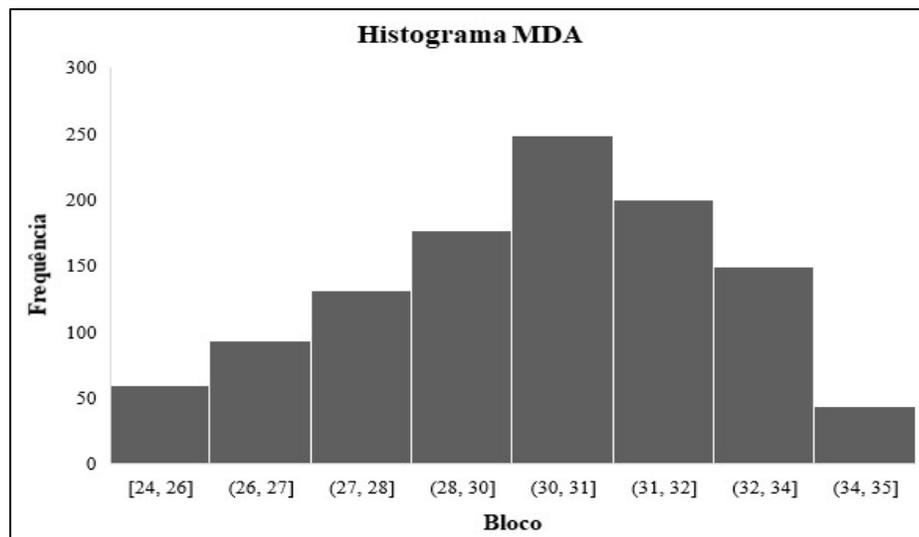
Figura 25. Localização geográfica dos locais das árvores com medidas encontrados no MDA



Fonte: Elaborado pelo autor

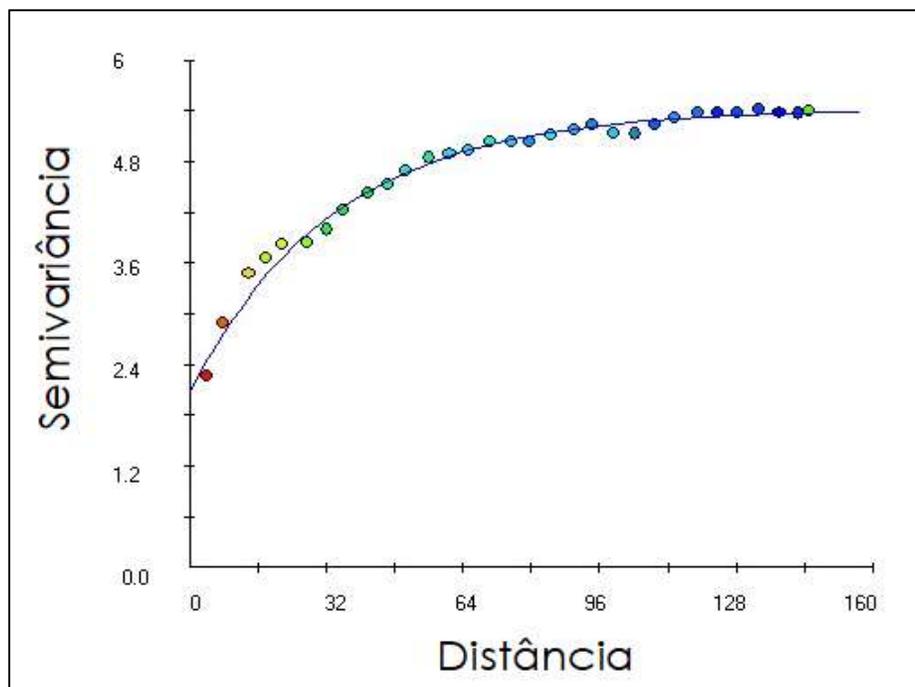
Na Figura 26 pode-se observar o histograma com as alturas das árvores que foram extraídas do MDA. De acordo com Yamamoto e Landin (2013) os dados que apresentam distribuição normal ou assimetria negativa não precisam de qualquer transformação nos dados. Assim, segundo Santos (2017), pode-se aplicar as análises geoestatísticas diretamente. O semivariograma gerado pode ser observado na Figura 27.

Figura 26. Histograma das alturas das árvores extraídas do MDA



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 27. Semivariograma das alturas das árvores extraídas do MDA



Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados da validação cruzada (Tabela 5), em que está apresentado o Coeficiente de Determinação (R^2) que mede a variação dos dados de acordo com o modelo ajustado com base na variação total dos dados e quanto mais próximo de 1, melhor o ajuste de modelo (BIASE; SANTANA, 2012), o valor encontrado foi de 0,64; a soma dos quadrados do erro (RQME), que determina o ajuste do modelo teórico ao semivariograma e quanto menor, melhor o ajuste do modelo (MIRANDA; FILHO; LASTORIA, 2015), observa-se que o valor encontrado foi baixo; o Coeficiente de Correlação de Pearson (r), valor encontrado de 0,8, indicando correlação forte positiva; e o Índice de Dependência Espacial (IDE) que mensura a influência dos valores dos dados entre si (ZIMBACK, 2001), o qual apresentou dependência espacial moderada.

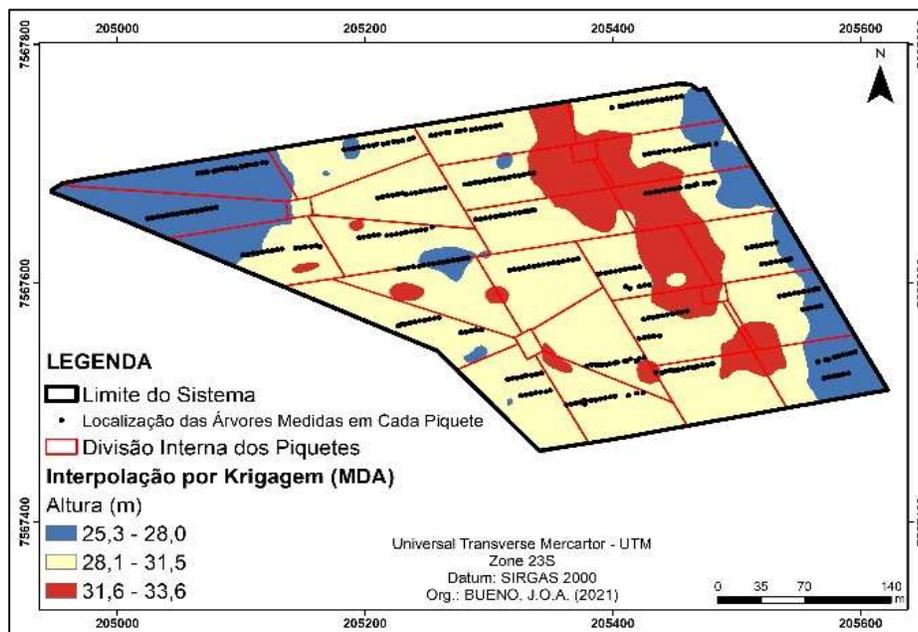
Tabela 5. Validação cruzada das alturas das árvores extraídas do MDA

Variável	Altura - MDA
Modelo de Ajuste	Exponencial
Dependência $(C1/(C1+C0))*100$	61,7
Correspondência	Moderada
r	0,8
R^2	0,64
RQME	0,002362

Fonte: Elaborada pelo autor

A interpolação dos dados por krigagem, bem como a localização geográfica das 360 árvores que foram extraídas do mapa interpolado, para comparação com os dados de campo, podem ser vistos na Figura 28.

Figura 28. Interpolação por krigagem das árvores com medidas encontradas no MDA



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados de altura medidos com clinômetro e estimados pela krigagem foram tabulados com as estatísticas descritivas de cada um (Tabela 6), para um N de 360 árvores, que foram medidas em campo. O valor do Coeficiente de Correlação de Pearson (r) foi menor do que o encontrado na comparação entre os dados do clinômetro e o MDA sem interpolação, sendo de 0,38, indicando uma correlação fraca positiva entre as alturas interpoladas pela krigagem com as medidas em campo com clinômetro.

Tabela 6. Estatística descritiva dos dados de altura medidos em campo e interpolados por krigagem

Parâmetros Estatísticos	Clinômetro	Krigagem - MDA
Média	30,4	29,3
Desvio P.	2,663	1,405
Curtose	-0,274	-0,519
Assimetria	-0,554	-0,402
Mínimo	21,8	26,1
Máximo	35,3	32,4
N		360

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que o intervalo de variação entre os dados de altura que foram extraídas do MDA e dos dados interpolados por krigagem, apresentaram diferença, ao passo que os valores interpolados apresentaram dados com variação menor, com diferenças entre os valores mínimos maiores que as encontradas na Tabela (4). O mesmo procedimento para interpolar os dados foi utilizado aplicando o método IDW (APENDICE A) e a tabela com os parâmetros estatísticos entre as alturas medidas com clinômetro também foi gerada (APENDICE B). Os resultados apresentaram Coeficiente de correlação de 0,36.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, em relação aos Modelos Digitais de Terreno, foram encontrados dados que indicam que há variação entre os intervalos de altitude em metros, das quatro fontes, os quais foram gerados a partir das imagens capturadas com drone; por imagens capturadas com veículo aéreo tripulado; com base em imagem de satélite; e com base nos pontos de altitudes obtidos com GPS Geodésico. No entanto, apesar das diferenças de variações entre os valores de altitude dos MDT, verificou-se que as variações em relação ao relevo do terreno se acompanham ao longo da área de estudo.

O MDA de altura obtido pela subtração do MDS pelo MDT, estimou alturas de eucalipto que variaram entre 24,4m a 33,4m. Os valores estimados pelo MDA apresentaram diferença média de altura de 0,9 metros comparado com as alturas medidas com clinômetro, sendo a média do segundo maior que a estimada pelo MDA. As alturas das árvores quando correlacionadas apresentaram Coeficiente de Correlação de Pearson de 0,58, indicando que há uma correlação moderada positiva entre as alturas medidas com clinômetro e as estimadas pelo MDA gerado com base nas imagens capturadas por drone.

Assim, os resultados apresentados corroboram a hipótese de que é viável estimar altura de eucaliptos no sistema de Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF), da Embrapa Pecuária Sudeste, processando imagens do visível adquiridas com o uso de drone e aplicação de geoprocessamento.

Com relação a aplicação de técnicas de geoestatística por meio de interpolador, usando Krigagem Ordinária, os valores de altura das árvores extraídos do mapa interpolado e comparado com os dados de altura medidos em campo com clinômetro, apresentaram Coeficiente de Correlação de Pearson de 0,38 (correlação fraca positiva), valor menor em relação a correlação obtida entre alturas estimadas pelo MDA e os dados medidos com clinômetro.

7 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos que lidem com essa mesma temática, sugere-se que sejam realizados voos aéreos em ao menos dois sentidos com relação às linhas das árvores, além de complementar com voos laterais (orbitais) nas áreas mais distantes das bordas da área de estudo e nas regiões internas. O número de imagens capturadas irá aumentar, bem como o tempo e os custos com processamento. Todavia, espera-se que haja mais sobreposição entre as imagens e maior correspondência dos pontos considerados comuns, diminuindo assim os possíveis locais com falhas nos MDA.

Sugere-se também que sejam realizados estudos que comparem as estimativas de altura das árvores, localizadas nos sistemas de integração, obtidas por meio de MDA gerados após o processamento das imagens capturadas com drone, com relação às imagens de satélite de alta resolução.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABER, J. S.; MARZOLFF, I.; RIES, J. **Small-format aerial photography: Principles, techniques and geoscience applications**. Elsevier, 2010.

Agência Nacional de Aviação Civil - ANAC. **Portaria n ° 2.031/SAR, de 4 de outubro de 2012**. Instrução Suplementar - IS N° 21-002, Revisão A. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <<http://www2.anac.gov.br/biblioteca/IS/2012/IS%2021002A.pdf>>. Acesso em: 07/07/2019.

AKTURK, E.; ALTUNEL, A. O. Accuracy assessment of a low-cost UAV derived digital elevation model (DEM) in a highly broken and vegetated terrain. **Measurement**, v. 136, p. 382-386, 2019.

ALMEIDA R.G.; ANDRADE C. M. S.; PACIULLO DS, FERNANDES PC, CAVALCANTE ACR, BARBOSA, R. A.; VALLE, C. B. Brazilian agroforestry systems for cattle and sheep. **Tropical Grasslands-Forrajões Tropicales** Vol. 1, p. 175–183, 2013.

ALVARENGA, R. C.; SILVA, V. P.; GONTIJO, M. M; VIANA, M. C. M.; VILELA, L. Sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: Condicionamento do solo e intensificação da produção de lavouras. **Informe Agropecuário**, v.31, p.59-67, 2010.

ALVES JÚNIOR, L. R. **Análise de Produtos Cartográficos Obtidos com Câmera Digital Não Métrica Acoplada a um Veículo Aéreo Não Tripulado em Áreas Urbanas e Rurais no Estado de Goiás**. Dissertação (Mestrado em Geografia) Universidade Federal de Goiás – GO, p.112, 2015.

ALVES, B. J. R.; MADARI, B. E.; BODDEY, R. M. Integrated crop-livestock-forestry systems: prospects for sustainable agricultural intensification. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Heidelberg, v. 108, n. 1, p. 1-4, 2017.

ANDRADE, R. O. O voo do Falcão. **Pesquisa FAPESP**, vol. 211, p. 64-69, 2013.

ASSIS, P. C. R.; STONE, L. F.; MEDEIROS, J. C.; MADARI, B. E.; OLIVEIRA, J. D. M.; WRUCK, F. J. Atributos físicos do solo em sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 309-316, 2015.

AVTAR, R.; SUAB, S. A.; SYUKUR, M. S.; KOROM, A.; UMARHADI, D. A.; YUNUS, A. P. Assessing the influence of UAV altitude on extracted biophysical parameters of young oil palm. **Remote Sensing**, v. 12, n. 18, p. 3030, 2020.

BALBINO, L. C.; MARTINEZ, G. B.; GALERANI, P. R. Ações de transferência de tecnologia de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta. Planaltina: **Embrapa Cerrados**; Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2011. 52p.

BARROS, E. R. O.; MAFRA FILHO, F. H. M. G.; ANDRADE, M. O.; SATO, S. S. As Potencialidades e Limitações do Uso de VANT no Monitoramento de Faixa de Domínio de Rodovias Federais. In: XXVII Congresso Brasileiro de Cartografia. Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** 06 a 09 de Novembro de 2017. Disponível em: <www.cartografia.org.br/cbc/trabalhos/5/550/CT05-49_1506742931.pdf>. Acesso em: 01/10/2019.

BATISTOTI, J.; MARCATO JUNIOR, J.; ÍTAVO, L.; MATSUBARA, E.; GOMES, E.; OLIVEIRA, B.; SOUZA, M.; SIQUEIRA, H.; SALGADO FILHO, G.; AKIYAMA, T.; GONÇALVES, W.; LIESENBERG, V.; LI, J.; DIAS, A. Estimating pasture biomass and canopy height in Brazilian savanna using UAV photogrammetry. **Remote Sensing**, v. 11, n. 20, p. 2447, 2019.

BENEDITTI, C. A. **Imagens multitemporais ALOS/PALSAR baseada em orientação a objeto na discriminação da cobertura da terra**. Dissertação - Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas - FCT/UNESP. Presidente Prudente – SP, 2010.

BERNARDI, A. C. C.; LAURENTI, N.; BETTIOL, G. M.; OLIVEIRA, P. P. A.; ALVES, T. C.; PEDROSO, A. D. F.; PEZZOPANE, R. M. Otimização do uso de insumos em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta com ferramentas de agricultura de precisão. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 13, n. 4, p. 290-300, 2019.

BIASE, A. G.; SANTANA, T. V. F. **Geostatística Análise de dados em outro software Gamma Design gS+**. Pós-graduação em Estatística e Experimentação Agronômica. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. 2012. Disponível em <http://leg.ufpr.br/lib/exe/fetch.php/disciplinas:geoesalq:tiago_gamma_gs_.pdf> Acesso em 19 Out 2020.

BUCK, A. L. B; SILVA, M. N.; LINGNAU, C.; MACHADO, A.M.L; MARTINS NETO, R. P.; PESCK, V. A. Avaliação da modelagem tridimensional do tronco de *Pinus elliottii* a partir de dados laser terrestre. **Ambiência**. v. 8, p. 549-557, 2012.

BUNGENSTAB, D. J. Sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta: a produção sustentável. Brasília, DF: **Embrapa**, 2012.

CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H. D. S.; DA FONSECA, O. O. M.; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. **Os solos da Fazenda Canchim, Centro de pesquisa de Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP: levantamento semidetalhado, propriedade e potenciais**. Embrapa-CNPS/São Carlos, 1998.

CÂMARA, G.; DAVIS, C. Introdução. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C. e MONTEIRO, A. M. V. (Ed.). **Introdução à Ciência da Geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2003. p.1-5.

CÂMARA, G.; DAVIS, C.; MONTEIRO, A. M. V. **Introdução à ciência da geoinformação**. São José dos Campos: INPE, 2001.

CAMARGO, E. C. G. **Geoestatística: Fundamentos e Aplicações**. 2006. Disponível em <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf> Acesso em: 17/08/2019.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: UFV, p. 605, 2013.

CARRIVICK, J. L.; SMITH, M. W.; QUINCEY, D. J. **Structure From Motion in the Geosciences**. Londres, Reino Unido: John Wiley & Sons, 2016.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 08, p. 1151-1159, 2002.

CARVALHO, J. W.; CHAGAS, C. D. S.; LAGACHERIE, P.; CALDERANO F. B.; BHERING, S. B. Evaluation of statistical and geostatistical models of digital soil properties mapping in tropical mountain regions. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 3, p. 706-717, 2014

CASBEER, D. W.; BEARD, R. W.; MCLAIN, T. W.; LI, S. M.; MEHRA, R. K. Forest fire monitoring with multiple small UAVs. In: **Proceedings of 2005, American Control Conference, 2005**. IEEE, p. 3530-3535, 2005.

CAWOOD, A. J.; BOND, C. E.; HOWELL, J. A.; BUTLER, R. W.; TOTAKE, Y. LiDAR, UAV or compass-clinometer? Accuracy, coverage, and the effects on structural models. **Journal of Structural Geology**, v. 98, p. 67-82, 2017.

CHAPLOT, V.; DARBOUX, F.; BOURENNANE, H.; LEGUÉDOIS, S.; SILVERA, N.; PHACHOMPHON, K. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models concerning landform types and data density. **Geomorphology**, v. 77, n. 1-2, p. 126-141, 2006.

CHERUBIN, M. R.; TORMENA, C. A.; KERLEN, D. L. Soil quality evaluation using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with contrasting texture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 41, p. 1-18, 2017.

COELHO, F. L. C. T.; BRITO, J. L. N. e S. Fotogrametria Digital. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2007. 196p.

COLOMINA, I.; MOLINA, P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. **ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing**, v. 92, p. 79-97, 2014.

COSTA, G. C.; DA SILVA, D. C. Pré-sinalização de pontos de apoio em aerofotogrametria com câmeras de pequeno formato. In: IV Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, 2012. Anais. 2014.

CURTO, R. A.; SILVA, G. F.; SOARES, C. P. B.; MARTINS, L. T.; DAVID, H. C. Métodos de estimação de altura de árvores em floresta estacional semidecidual. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 1, p. 105-116, 2013.

DAINESE, R. C. **Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicado ao estudo temporal do uso da terra e na comparação entre classificação não supervisionada e análise visual**. Dissertação (Mestrado em Agronomia), Universidade Estadual Paulista, Botucatu, p. 186, 2001.

DAVID, H. C. **Métodos de medição de altura de árvores em uma floresta nativa do sul do Espírito Santo**. Monografia. Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, p. 34, 2011.

DISPERATI, A. A.; AMARAL, R. F.; SCHULER, C. A. B. **Fotografias aéreas de pequeno formato: aplicações ambientais**. Guarapuava: Unicentro. p. 262, 2007.

DOERING, D.; BENENMANN, A.; LERM, R.; FREITAS, E. P.; MULLER, I.; WINTER, J. M.; PEREIRA, C. E. Design, and optimization of a heterogeneous platform for multiple UAV use in precision agriculture applications. **IFAC Proceedings Volumes**, v. 47, n. 3, p. 12272-12277, 2014.

FENG, Q.; LIU, J.; GONG, J. UAV remote sensing for urban vegetation mapping using random forest and texture analysis. **Remote sensing**, v. 7, n. 1, p. 1074-1094, 2015.

FIGUEIRA, N. M.; VOLOTÃO, C. F. S. Detecção de contorno de alvos em imagens adquiridas por VANT. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 65/4, p. 643-650, 2012.

FIGUEIREDO, E. O.; OLIVEIRA, M. D.; LOCKS, C. J.; PAPA, D. D. A. **Estimativa do Volume de Madeira em Pátios de Estocagem de Toras por meio de Câmeras RGB Instaladas em Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP)**. Rio Branco: Embrapa Acre - Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 2016. 41 p.

FISHER, N. I.; LEWIS, T.; EMBLETON, B. J. **Statistical analysis of spherical data**. Cambridge university press, 1993.

FLORENZANO, T. G. **Imagens de Satélite para Estudos Ambientais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

FOLEY, J. A.; DEFRIES, R. ASNER, G. P.; BARFORD, C.; BONAN, G.; CARPENTER, S. R.; CHAPIN, F. S.; COE, M. T.; DAILY, G. C.; GIBBS, H. K.; HELKWSKI, J. H.; HOLLOWAY, T.; HOWARD, E. A.; KUCHARIK, C. J.; MONFREDA, C.; PATZ, J. A.; PRENTICE, I. C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. K. Global consequences of land use. **Science**, v. 309, n. 5734, p. 570-574, 2005.

FONSTAD, M. A.; DIETRICH, J.T.; COURVILLE, B. C.; JENSEN, J.L.; CARBONNEAU, P.E. Topographic Structure from Motion: A New Development in Photogrammetric Measurement. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 38, n.4, p. 421-430, 2013.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A. Crop and cattle production responses to tillage and cover crop management in an integrated crop-livestock system in the southeastern USA. **European Journal of Agronomy**, Montrouge Cedex, v. 57, p. 62-70, 2014.

FRASER, R. H.; VAN D. S. J.; HALL, R. J. Calibrating satellite-based indices of burn severity from UAV-derived metrics of a burned boreal forest in NWT, Canada. **Remote Sensing**, v. 9, n. 3, p. 279, 2017.

GIL, J.; SIEBOLD, M.; BERGER, T.; Adoption and development of integrated crop-livestock-forestry systems in Mato Grosso, Brazil. **Agric Ecosyst Environ.** p. 394-406, 2015.

GIONGO, M.; KOEHLER, H.S.; MACHADO, S. do A.; KIRCHNER, F.F.; MACHETTI, M. LiDAR: princípios e aplicações florestais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.30, p.231-244, 2010.

GIS IBÉRICA EQUIPOS DE PRECISIÓN. **Hipsómetro y clinómetro HAGLOF**. Acesso em: 23 de Abril de 2021. Disponível em <<http://www.gisiberica.com/hips%F3metros/HS115-hiipsometro-clinometro-EC-II-D-R-HAGLOF.html>>.

GIUFFRIDA, F. Potential Uses, and Considerations Regarding the Use of UAS Technology in Assessment. Inc.: **Property Drone Consortium**. 2015. Disponível em: <http://www.propertydrone.org/docs/Potential_Uses_Considerations_Regarding_UAS_Technology_Assessment.pdf>. Acesso em: 04/07/2019.

GOMES, N. M.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; FARIA, M. A.; OLIVEIRA, P. M. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 3, p. 435-443, 2010

GONTIJO, N. M. M.; BORGHI, E.; ALVARENGA, R. C.; RESENDE, A. V.; VIANA, M. C. M. Milho e sorgo: culturas estratégicas para arranjos produtivos em integração lavoura-pecuária-floresta. **Embrapa Milho e Sorgo-Capítulo em livro científico (ALICE)**, 2018.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 476 p.

GRAÇA, N. L. S. D. S.; MITISHITA, E. A.; GONÇALVES, J. E. Use of UAV platform as an autonomous tool for estimating expansion on invaded agricultural land. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 23, n. 3, p. 509-519, 2017.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 2, p. 169-177, 2005.

GREGÓRIO, L. S.; PANIAGO, L. N. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento para Concursos Públicos**. Brasília, 2013.

HE, J.; LIN, J.; MA, M.; LIAO, X. Mapping topo-bathymetry of transparent tufa lakes using UAV-based photogrammetry and RGB imagery. **Geomorphology**, p. 107832, 2021.

HUNG, M. N. W. B.; SAMPAIO, T. V. M.; SCHULTZ, G. B.; SIEFERT, C. A. C.; LANGE, D. R.; MARANGON, F. H. S.; SANTOS, I. Levantamento com Veículo Aéreo Não Tripulado para Geração de Modelo Digital do Terreno em Bacia Experimental com Vegetação Florestal Esparsa. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, 43, p. 215-231, 2018.

INGUAGGIATO, F. F. **Utilização das aeronaves remotamente pilotadas como ferramenta de análise da pós-ocupação de uso do solo: o estudo de caso do Shopping Passeio, São Carlos (SP) e seu estudo de impacto de vizinhança**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos – SP, 2020.

JAKOB, A. A. E. **A Krigagem como Método de Análise de Dados Demográficos**. 2002. XIII Encontro da Associação Brasileira de Estudos Populacionais, realizado em Ouro Preto, Minas Gerais. Disponível em <http://www.abep.nepo.unicamp.br/docs/anais/pdf/2002/GT_SAU_ST3_Jakob_texto.pdf> Acesso em: 19/07/2019.

JAMES, M. R.; ROBSON, S.; SMITH, M. W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 42, n. 12, p. 1769–1788, 2017.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an earth resource perspective**. New Jersey: **Prentice-Hall**, p. 544, 2000.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento Remoto do Meio Ambiente: Uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009.

JORGE, L. A. C.; TRINDADE, J. O. **Circular técnica nº 15: Metodologia para utilização de aeromodelos em monitoramento aéreo**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, p. 6, 2002.

JORGE, L.; INAMASU, R. Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em Agricultura de Precisão. **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**, Embrapa Instrumentação – São Carlos, SP, Brasil, p. 109-134, 2014.

KALAF, R.; BRASILEIRO, R.; CARDOSO, P.V.; CRUZ, B. M. C. Landsat 8: Avanços para mapeamento em mesoescala. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 2013. Rio de Janeiro. **Anais**. Disponível em: <http://www.cartografia.org.br/cbg/trabalhos/90/51/resumo-geotec-roberta-raissa1_1374611841.pdf>. Acesso em: 01/10/2019.

KAWAKUBO, F. S.; MORATO, R. G.; CAMPOS, K. C.; LUCHIARI, A.; ROSS, J. L. S. Caracterização empírica da fragilidade ambiental utilizando geoprocessamento. In: **Anais**. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiania – GO. INPE, p. 2203 – 2210, 2005.

KRIGE, D. G. A statistical approach to some basic mine evaluation problems on the Witwatersrand. **Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa**, v. 52, p. 151-163, 1951.

KRUGER, C. M. **Análise geoestatística de dados meteorológicos do estado do Paraná utilizando um software livre**. da Vinci, Curitiba, v. 2, n. 1, p. 87-104, 2005. Disponível em <<http://www.up.edu.br/davinci/2/07.pdf>> Acesso em 19/07/2019.

LAURENTTI, N.; BUENO, O. A.; PEZZOPANE, J.; GARCIA, A.; BERNARDI, A. D. C. Termografia de superfície por sensoriamento remoto em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. In: **Embrapa Pecuária Sudeste - Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 2019, São Carlos, SP. Anais... São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2019., 2019.

LAURO, A. C.; CURTO, R. D. A.; TONINI, H.; BIAZATTI, S. C.; KOHLER, S. V. Operacionalidade de instrumentos na obtenção da altura total de árvores em sistema agrossilvipastoril. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 4, p. 445–451, 2018.

LI, J.; HEAP, A. D. A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: Performance and impact factors. **Ecological Informatics**, v. 6, n. 3-4, p. 228-241, 2011.

LIMA NETO, E. M. **Aplicação do sistema de informações geográficas para o inventário da arborização de ruas de Curitiba, PR.** (Dissertação de mestrado), Curitiba: Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, 2011.

LIMA, C.; LAURENTI, N.; NICODEMO, M.; PEZZOPANE, J.; GARCIA, A.; BERNARDI, A. D. C. Comparação de temperaturas de superfície de sistema de integração lavoura, pecuária e floresta (ILPF), pastagem e mata nativa por meio de imagens. In: **Embrapa Pecuária Sudeste-Artigo em anais de congresso (ALICE)**. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE INSTRUMENTAÇÃO AGROPECUÁRIA, 4., 2019, São Carlos, SP. **Anais**. São Carlos, SP: Embrapa Instrumentação, 2019., 2019.

LINGNAU, C.; MACHADO, A. M. L.; BAVARESCO JÚNIOR, A.; COLLA, F. L. Determinação de diâmetros a diferentes alturas de árvores individuais a partir de dados laser terrestre. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 14, 2009, Natal. **Anais**. Natal: INPE, 2009.

LONGHITANO, G. A. **VANTS para Sensoriamento Remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3138/tde-10012011-105505/pt-br.php>>. Acesso em: 10/06/2019.

LOSS, A.; PEREIRA, M. G.; BEUTLER, S. J.; PERIN, A.; ANJOS, L. H. C. dos. Densidade e fertilidade do solo sob sistemas de plantio direto e de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Revista Ciências Agrárias**, v.55, p.260-268, 2012.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**, 2. ed. Guarapuava: Unicentro, p. 316, 2009.

MAIA, S. M. F.; XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S.; ARAÚJO F. J. A. Impactos de sistemas agroflorestais e convencional sobre a qualidade do solo no semi-árido cearense. **Revista Árvore**, v.30, p.837-848, 2006.

MEDEIROS, F. A. **Desenvolvimento de um veículo aéreo não tripulado para aplicação em agricultura de precisão.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, p. 102, 2007.

MELO, R. R. S.; COSTA, D. B. **Uso de Veículo Aéreo Não Tripulado (Vant) para Inspeção de Logística em Canteiros de Obra**. SIBRAGEC. São Carlos – SP. 2015. Disponível em: <http://www.infohab.org.br/sibraelagec2015/artigos/SIBRAGECELAGEC_2015_submission_95.pdf>. Acesso em: 15/10/2019.

MENDES, T. A.; MARIANO, J. V.; MARQUES, P. H. G.; SANTOS, L. D. P. S. Diagnóstico ambiental da área de preservação permanente da nascente do Córrego Almeida utilizando ferramenta de geoprocessamento (Aparecida de Goiânia-GO). **Ciência e Natura**, v. 38, n. 3, p. 1331-1345, 2016.

MICHELETTI, N.; CHANDLER, J. H.; LANE, S. N. Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from motion photogrammetry using a smartphone. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 40, n. 4, p. 473–486, 2015.

MIRANDA, C. S.; FILHO, A. C. P.; LASTORIA, G. Aplicação da geoestatística no estudo da variabilidade espacial da piezometria. In: **Anais XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, João Pessoa – PB. INPE, p. 1923- 1928, 2015.

MIRANDA, G. H. B.; MEDEIROS, N. G.; SANTOS, A. P.; SANTOS, G. R. Análise de Qualidade de Amostragem e Interpolação na Geração de MDE. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 70, n. 1, p. 226-257, 2018.

MITAS, L.; MITASOVA, H. Spatial interpolation. **Geographical information systems: principles, techniques, management and applications**, v. 1, n. 2, 1999.

MOLIN, J. P. Agricultura de precisão no Brasil: estado atual e perspectivas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SOJA, v. 6, Cuiabá. **Anais**, 2012.

NERIS, L. O. **Um piloto automático para as aeronaves do projeto ARARA**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Computação) - Universidade de São Paulo, São Carlos, p. 102, 2001.

NEX, F.; REMONDINO, F. UAV for 3D mapping applications: A review. **Applied Geomatics**, v. 6, n. 1, p. 1-15, 2014.

NICOLETTI, E. A. M.; FERREIRA, R. L. Geotecnologia aplicada à perícia ambiental. **Caderno Meio Ambiente e Sustentabilidade**, v.6 n.4, p.37-56, 2015.

NIETHAMMER, U.; JAMES, M. R.; ROTHMUND, S.; TRAVELLETTI, J.; JOSWIG, M. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. **Engineering Geology**, v. 128, p. 2-11, 2012.

NOOR, M; ABDULLA, A.; HASHIM, M. Remote sensing UAV/drones and its applications for urban areas: a review. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**,v. 169, n. 01, 2018.

NUTTO, L.; TONINI, H.; BORSOI, G. A.; MOSKOVICH, F. A.; SPATHELF, P. Utilização dos parâmetros da copa para avaliar o espaço vital em povoamentos de *Pinus Elliottii* Engelm. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.42, p. 123-138, 2001.

OCA, A. M.; FLORES, G. The AgriQ: A low-cost unmanned aerial system for precision agriculture. **Expert Systems with Applications**, v. 182, p. 115163, 2021.

OLIVEIRA, F. F. G. **Aplicação das técnicas de geoprocessamento na análise dos impactos ambientais e na determinação da vulnerabilidade ambiental no litoral sul do Rio Grande do Norte**. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2011.

OLIVEIRA, R. P.; GRECO, C. R.; BRADAO, Z. N. **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o Vesper**. Brasília - DF: Embrapa, p. 159, 2015.

OLIVEIRA, X. M.; OLIVEIRA, R. R.; RAMALHO, F. M. G.; CABACINHA, C. D.; ASSIS, A. L. Precisão e tempo de operação de alguns instrumentos para medir altura de árvores. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v.10, n.18, p. 2336-2344, 2014.

ORTIZ-SANZ, J.; GIL-DOCAMPO, M.; REGO-SANMARTÍN, T.; ARZA-GARCÍA, M.; TUCCI, G. A PBeL for training non-experts in mobile-based photogrammetry and accurate 3-D recording of small-size/non-complex objects. **Measurement**, v. 178, p. 109338, 2021.

PANDE-CHHETRI, R.; ABD-ELRAHMAN, A.; LIU, T., MORTON, J.; WILHELM, V. L. Object-based classification of wetland vegetation using very high-resolution unmanned air system imagery **European Journal of Remote Sensing**. v. 50, n.1, p. 564-576, 2017.

PANG, K.; VAN S. J. W.; NAVARRETE, T. Responses of legumes and grasses to non-, moderate, and dense shade in Missouri, USA. I. Forage yield and its species-level plasticity. **Agroforest Syst** v. 93, p. 25–38, 2019.

PASSALACQUA, P.; BELMONT, P.; STALEY, D. M.; SIMLEY, J. D.; ARROWSMITH, J. R.; BODE, C. A.; CROSBY, C.; DELONG, S. B.; GLENN, N. F.; KELLY, S. A.; LAGUE, D.; SANGIREDDY, H.; SCHAFFRATH, K.; TARBOTON, D. G.; WASKLEWICZ, T.; WHEATON, J. M. Analyzing high-resolution topography for advancing the understanding of mass and energy transfer through landscapes: A review. **Earth-Science Reviews**, v. 148, p. 174-193, 2015.

PEREIRA, J. P. **Mensuração automática de copas de Araucaria angustifolia (Bertol.) Kuntze a partir de dados LiDAR para estimativa de variáveis dendrométricas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2014.

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P. P. A.; MARCONATO, M. H.; PEDROSO, A. F.; ESTEVES, S. N. Forage productivity, and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 1, p. 39-49, 2019b.

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C. C.; MULLER, M. D.; OLIVEIRA, P. P. A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: Productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 312, p. 107350, 2021.

PEZZOPANE, J. R. M.; NICODEMO, M. L. F.; BOSI, C.; GARCIA, A. R.; LULU, J. Animal thermal comfort indexes in silvopastoral systems with different tree arrangements. **Journal of thermal biology**, v. 79, p. 103-111, 2019a.

PONZONI, F. J. **Sensoriamento remoto no estudo da vegetação: diagnosticando a mata atlântica**. Curso de uso de sensoriamento remoto no estudo do meio ambiente. São José dos Campos: INPE, p. 27, 2002. Capítulo 8. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.13.11>>. Acesso em: 03/10/2019.

PRZYBILLA, H. J.; WESTER-EBBINGHAUS, W. Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug. **Bildmessung und Luftbildwesen**, v. 47, n. 5, p. 137-142, 1979.

ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 8, p. 63-73, 1994.

SANQUETTA, C. R. Métodos de determinação de biomassa florestal. In: Sanquetta, c.r. (Ed.). **As florestas e o carbono**. Curitiba: UFPR, p.119-140, 2002.

SANTOS, K. E. L. **Geoestatística e geoprocessamento aplicados à tomada de decisão agroambiental em um sistema de produção de leite a pasto intensivo**. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

SANTOS, T. T.; KOENIGKAN, L. V. **Produção de ortomapas com VANTs e OpenDroneMap**. Circular Técnica 05. Embrapa Informática Agropecuária, Campinas. 2018.

SARIPALLI, S.; MONTGOMERY, J. F.; SUKHATME, G. S. Visually guided landing of an unmanned aerial vehicle. **IEEE transactions on robotics and automation**, v. 19, n. 3, p. 371-380, 2003.

SCOLFORO, J. R. S.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Biometria Florestal: medição e volumetria de árvores**. Lavras: UFLA/FAEPE, p. 310, 2008.

SENA, N. C.; VELOSO, G. V.; FERNANDES-FILHO, E. I.; FRANCELINO, M. R.; SCHAEFER, C. E. G. Analysis of terrain attributes in different spatial resolutions for digital soil mapping application in southeastern Brazil. **Geoderma Regional**, v. 21, p. e00268, 2020.

SILVA, D. C. C.; MORO, M. K.; MOYA, K. J.; PINHEIRO, M. M.; SIMONETTI, V. C. Proposta metodológica para definição de áreas prioritárias para recuperação vegetal de Áreas de Preservação Permanente. **Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, Florianópolis, v. 7, n. 4, p. 540-562, 2018.

SILVA, D. C.; MELO, I. D. F.; OLIVEIRA, R. N. Alta Resolução com uso de Câmeras Digitais de Baixo Custo para Mapeamento. **Anais. XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Goiânia, Brasil, INPE, p. 4561-4568, 2005.

SILVA, G. F.; CURTO, R. A.; SOARES, C. P. B.; PIASSI, L. C. Avaliação de métodos de edição de altura em florestas naturais. **Revista Árvore**, Viçosa, v.36, n. 2, p. 341-348, 2012.

SILVA, M. B. **Uso de VANT para a adequação ambiental e restauração de áreas degradadas do uso do solo em propriedades rurais: "estudo de caso em uma propriedade rural no município de Dourados-MS"**. Universidade Federal do Paraná, p. 58, 2016.

SILVA, V. P. Produtividade em sistema de integração lavoura-pecuária — floresta no subtropical brasileiro. 2012. **Tese de doutorado**. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, p. 11º.

SILVESTRE, M. R. **Técnicas estatísticas utilizadas em climatologia geográfica: diagnóstico e propostas.** 2016. 409p. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Ciência e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

SLOMPO, P. J. H. **Utilização de um veículo aéreo não tripulado para obtenção de dados dendrométricos de Eucalyptus Benthamii maiden et cambage.** Dissertação (Mestrado em Agronomia - Concentração e Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, p. 51, 2013.

SNAVELY, N.; SEITZ, S. M.; SZELISKI, R. Modeling the World from Internet Photo Collections. **International Journal of Computer Vision**, v. 80, n.2, p. 189-210, 2008.

SOARES, A. **Geostatística para as ciências da terra e do ambiente.** Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2006. 214 p.

SOUSA, E.B. **Técnicas de Processamento de Imagens Aplicadas à Localização de Solos Lateríticos.** (Dissertação de mestrado) São José dos Campos: ITA, 1996.

SOUZA, A. 2016. Coeficiente de Correlação Linear de Pearson. Disponível em Acesso em 12 Set 2016.

SRIVASTAVA, R. M. Describing spatial variability using geostatistics analysis. In: SRIVASTAVA, R. M.; ROUHANI, S.; CROMER, M. V.; JOHNSON, A. I.; DESBARATS, A. J. (Ed.). **Geostatistics for environmental and geotechnical applications.** West Conshohocken: ASTM, 1996. p. 13-19.

SZELISKI, R. **Computer Vision: Algorithms and Applications.** Washington DC, EUA: Springer, v.1, p.957, 2010.

TAVANI, S.; CORRADETI, A.; BILLI, A. High precision analysis of an embryonic extensional fault-related fold using 3D orthorectified virtual outcrops: The viewpoint importance in structural geology. **Journal of Structural Geology**, v. 86. p. 200-210. 2016.

TEXEIRA, M. R. **A utilização do geoprocessamento na análise ambiental e sua importância na tomada de decisões: um estudo sobre o uso do geoprocessamento em pesquisas sobre ocupação desordenada do solo.** 41f. Monografia (Graduação em Análise ambiental e Desenvolvimento sustentável) – Centro Universitário de Brasília, Brasília, 2015.

TOKARCZYK, P. High-quality observation of surface imperviousness for urban runoff modeling using UAV imagery. **Hydrology and Earth System Sciences Discussions**, v. 19, p. 4215-4228, 2015.

TONINI, H.; MORALES, M. M.; MENEGUCI, J. L. P.; ANTONIO, D. B. A.; WRUCK, F. J. Biomassa e área foliar de clones de eucalipto em ILPF: Implicações para Desrama. **Nativa**, Sinop, v. 4, n. 5. P. 271-274, 2016.

UYSAL, M.; TOPRAK, A. S.; POLAT, N. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. **Measurement**, v. 73, p. 539-543, 2015.

VALLE, I. C.; FRANCELINO, M. R.; PINHEIRO, H. S. K. Mapeamento da fragilidade ambiental na Bacia do Rio Aldeia Velha, RJ. **Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v.23, n. 2, p.295-308, 2016.

VAN IERSEL, W.; STRAATSMA, M.; ADDINK, E.; MIDDELKOOP, H. Monitoring height and greenness of non-woody floodplain vegetation with UAV time series. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 141, p. 112-123, 2018.

VARELLA, C. A. A.; JUNIOR, D. G. S. **Estudo do Interpolador IDW do ArcView para Utilização em Agricultura de Precisão**. Departamento de Engenharia, 2008. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Disponível em <http://www.ufrjr.br/institutos/it/deng/varella/Downloads/IT190_principios_em_agricultura_de_precisao/Aulas/Estudo%20do%20interpolador%20idw%20arcview.htm>. Acesso em: 19/07/2019.

VEIGA, T. C.; SILVA, J. X. da. Geoprocessamento aplicado à identificação de áreas potenciais para atividades turísticas: O caso do Município de Macaé – RJ. In: SILVA, J. X. & ZAIDAN, R. T. (Org.) **Geoprocessamento & Análise ambiental**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p.179-215, 2004.

VERHOEVEN, G.; SEVARA, C. KAREL. W. RESSL, C.; DONEUS, M.; BRIESE, C. Undistorting the Past: New Techniques for Orthorectification of Archaeological Aerial Frame Imagery. **Natural Science in Archaeology**, p. 31-67, 2013.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre a qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.743-755, 2009.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1-54, 2000.

VITTI, D. M. C. **Exatidão posicional de produtos cartográficos digitais com RPAS (Remotely Piloted Aerial System) para mapeamento da área seca de reservatório**. 2017. 202 p. Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

WALDORF, B. S. Inhabitants of Earth. In: EISE, J.; FOSTER, K. (Ed.). **How to Feed the Word**. Washington, DC: Island Press, 2018. P. 5-23.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, p. 319-344, 1980.

WEIS, C. V. C.; HASENACK, H.; BECKER, F. G.; LIMA, L. T.; TERCEIRO, A. M. Ferramentas de geoprocessamento aplicadas na análise temporal das conectividades entre lagoas do litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil. **Anais**. XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto SBSR. INPE, p.5523 5528, 2013.

WESTER-EBBINGHAUS, W. Aerial photography by radio-controlled model helicopter. **The Photogrammetric Record**, v. 10, n. 55, p. 85-92, 1980.

WESTOBY, M. J.; BRASINGTON, J.; GLASSER, N. F.; HAMBREY, M. J.; REYNOLDS, J. M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. **Geomorphology**, v. 179, p. 300-314, 2012.

XAVIER, S. **Geoprocessamento e SIGs**. Rio de Janeiro: IGEO, p. 104, 2000.

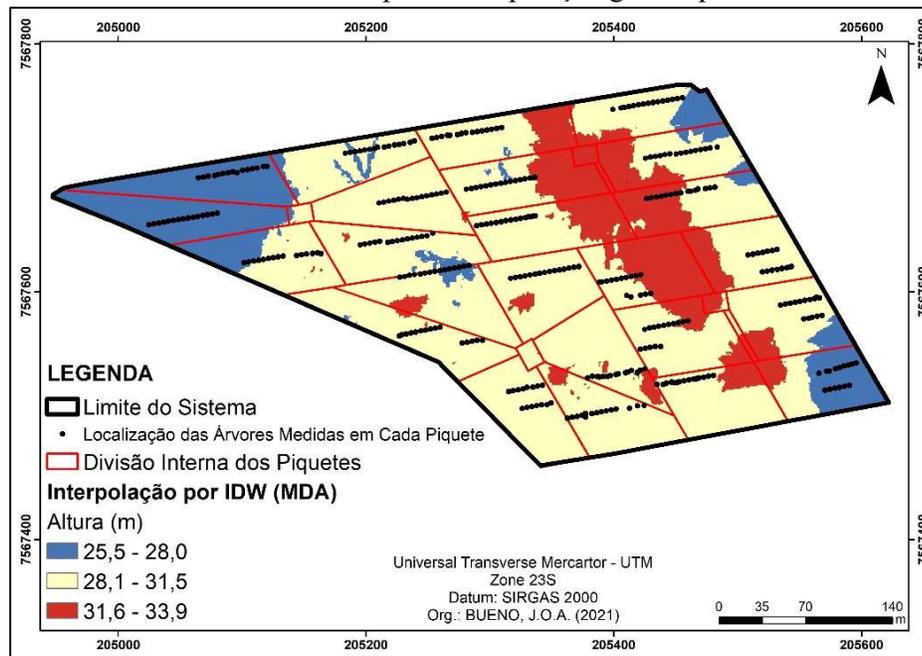
YAMAGUCHI, T.; TANAKA, Y.; IMACHI, Y.; YAMASHITA, M.; KATSURA, K. Feasibility of Combining Deep Learning and RGB Images Obtained by Unmanned Aerial Vehicle for Leaf Area Index Estimation in Rice. **Remote Sensing**, v. 13, n. 1, p. 84, 2021.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

ZANAO JÚNIOR, L.A.; LANA, R.M.Q.; GUIMARÃES, E.C.; PEREIRA, J.M.A. Variabilidade espacial dos teores de macronutrientes em latossolos sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.389-400, 2010.

ZIMBACK, C. R. L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade**. 2001. 114 f. Tese de Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

APENDICE A – Mapa de interpolação gerado por IDW



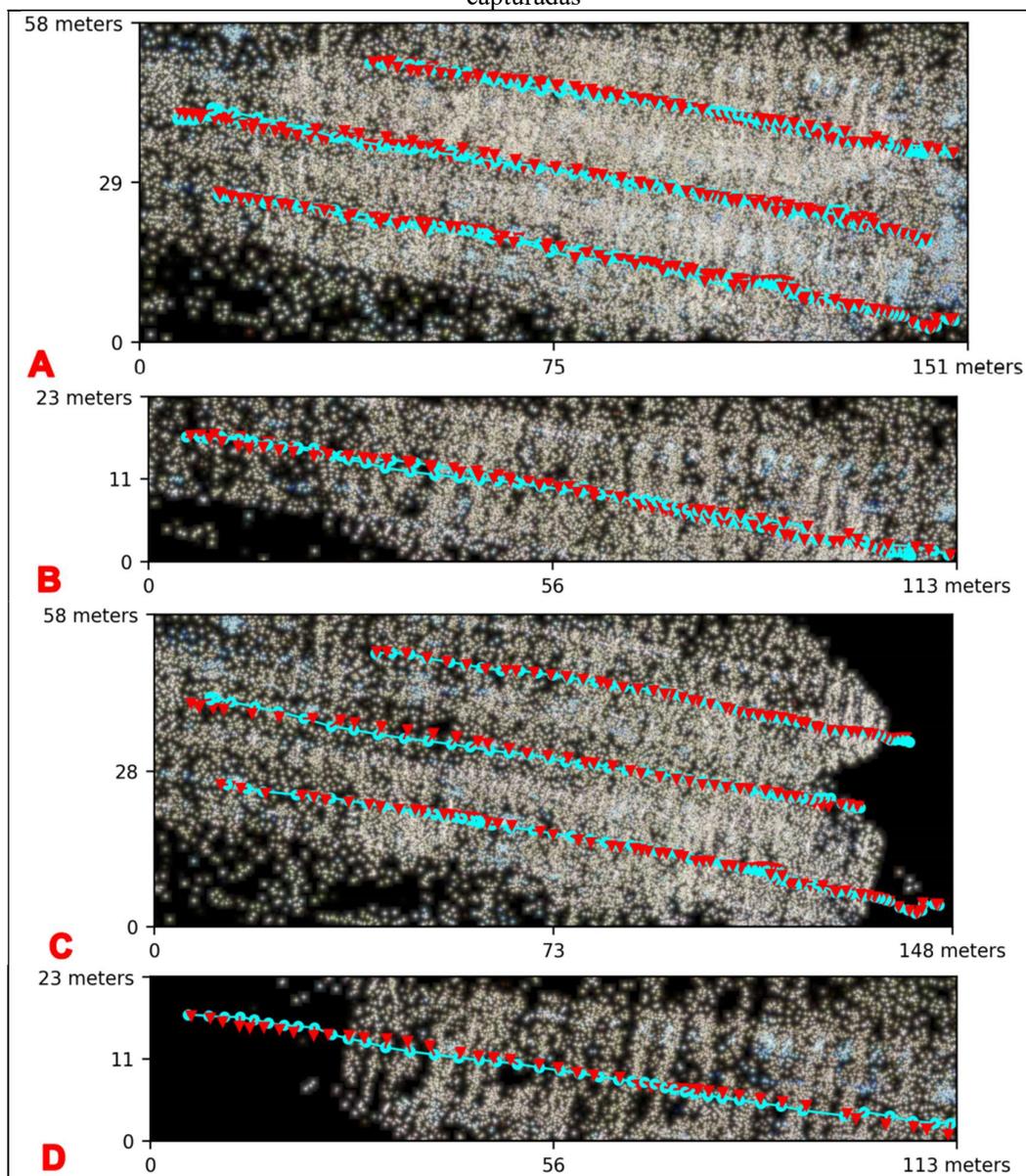
APENDICE B - Estatística descritiva dos dados de altura medidos em campo e interpolados por IDW

Parâmetros Estatísticos	CLINÔMETRO	IDW - MDA
Média	30.4	29.4
Desvio P.	2.663	1.395
Curtose	-0.274	-0.177
Assimetria	-0.554	-0.483
Mínimo	21.8	26.1
Máximo	35.3	32.6
N		360

APENDICE C – Dados de Diâmetro na Altura do Peito (DAP) dos eucaliptos - A interpretar

Foram realizados percursos de voo com o drone entre as linhas dos eucaliptos. Realizou-se um total de 4 voos (Figura 29). O que apresentou melhores resultados foi o realizado na altura de 10m entre as linhas (Figura 29d).

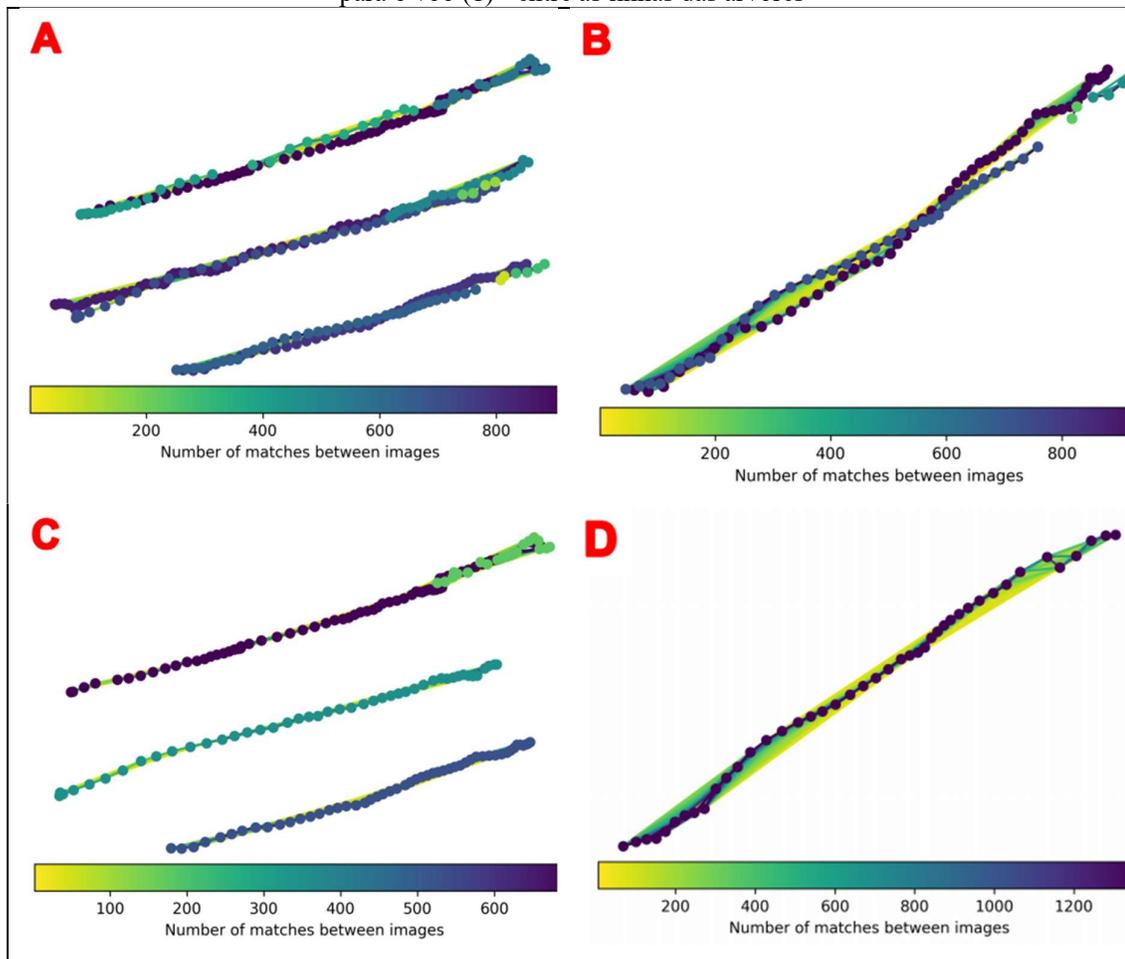
Figura 29. A - Percurso de voo (1) entre as linhas das árvores; B – Percurso do voo (2); C- Percurso do voo (3); D – Percurso do voo (4), os triângulos representam o momento em que as imagens foram capturadas



Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 30 encontra-se os detalhes do percurso dos voos, realizado pelo drone entre as linhas das árvores. Por meio da figura pode-se observar uma correspondência intermediária entre os pontos nos percursos de voo (1) (Figura 30a), voo (2) (Figura 30b) e no percurso de voo (3) (Figura 30c). Porém, nota-se que o percurso de voo (4) (Figura 30d) apresentou, em todo o trajeto, os maiores números de pontos correspondentes entre as imagens.

Figura 30. Número de pontos correspondentes no percurso entre as imagens capturadas com drone para o voo (1) - entre as linhas das árvores

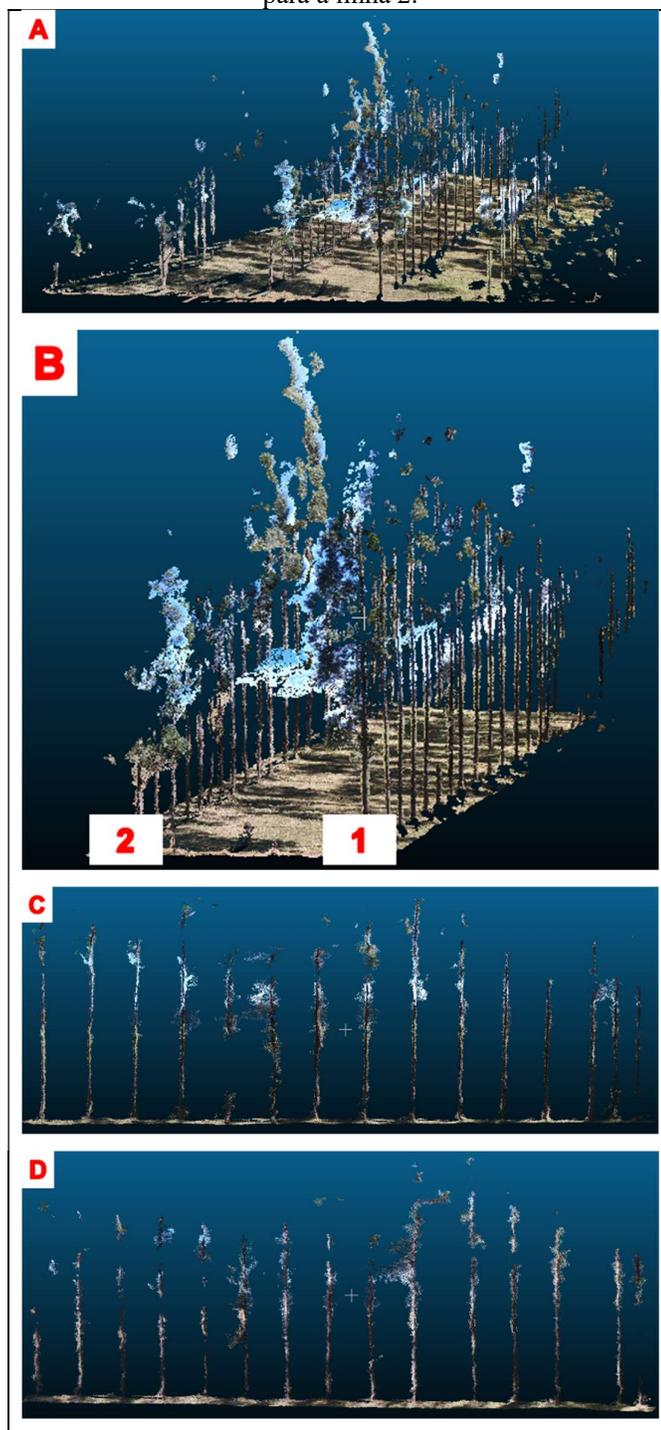


Fonte: Elaborado pelo autor

O voo realizado com o drone entre as linhas das árvores a uma altura de 10 metros, capturou um total de 43 imagens. A nuvem tridimensional de pontos gerada apresentou 2,253,056 pontos (Figura 31a). A nuvem tridimensional segmentada apenas para a área de interesse, ou seja, entre as linhas das árvores, apresentou 1.310,491 pontos (Figura 31b).

Na sequência a nuvem tridimensional de pontos foi segmentada apenas para as duas linhas das árvores. A linha (1) – direita apresentou um total de 182.827 pontos (Figura 31c). A linha (2) – esquerda apresentou um total de 198.707 pontos (Figura 31d).

Figura 31. A - Nuvem tridimensional sem filtragem dos pontos do voo (4) entre as linhas das árvores;
B - Nuvem tridimensional com filtragem dos pontos para as duas linhas de árvores;
C - Nuvem tridimensional de pontos segmentada para a linha 1;
D - Nuvem tridimensional de pontos segmentada para a linha 2.



Fonte: Elaborado pelo autor

O DAP da altura do peito foi medido com base na nuvem tridimensional de pontos das Figuras 31c e 31d. A Tabela 7 mostra as medidas de DAP de cada planta, bem como o número de pontos encontrados na nuvem tridimensional e as coordenadas geográficas de cada uma das árvores.

Tabela 7. Valores de DAP, número de pontos e localização geográfica de cada árvore

Planta	DAP - Nuvem de pontos	Número de pontos	Log (X)	Lat (Y)
1	27.91	5397	-47.851401	-21.971059
2	30.76	9501	-47.851439	-21.971065
3	26.77	11594	-47.851477	-21.971071
4	26.08	13861	-47.851516	-21.971077
5	28.88	13987	-47.811554	-21.971082
6	27.37	10807	-47.851592	-21.971088
7	25.63	10988	-47.851253	-21.971178
8	27.22	12317	-47.851291	-21.971184
9	27.61	11802	-47.85133	-21.971191
10	26.64	8282	-47.851368	-21.971197
11	22.05	5791	-47.851406	-21.971203
12	27.65	12692	-47.851444	-21.971209
13	24.43	8767	-47.851482	-21.971215

Fonte: Elaborado pelo autor