



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**VINÍCIUS BITENCOURT CAMPOS CALOU**

**ESTIMATIVA DA BIOMASSA DA CULTURA DO MILHO POR MEIO DE  
VANT/DRONE**

**FORTALEZA**

**2016**

VINÍCIUS BITENCOURT CAMPOS CALOU

ESTIMATIVA DA BIOMASSA DA CULTURA DO MILHO POR MEIO DE  
VANT/DRONE

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como parte das exigências da disciplina Atividade Supervisionada para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Adunias dos Santos  
Teixeira, Ph.D.

FORTALEZA

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

---

C164e Calou, Vinícius Bitencourt Campos.  
Estimativa da biomassa da cultura do milho por meio de VANT/Drone. / Vinícius Bitencourt Campos Calou. - 2016.  
77 f. : il. color.

Monografia (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, Graduação em Agronomia, Fortaleza, 2016.

Orientação: Prof. Ph.D. Adunias dos Santos Teixeira

Coorientação: Prof. Dr. Luis Clenio Jário Moreira

1. Agricultura de precisão. 2. Biomassa - Milho. 3. Agricultura - Processamento de dados. I. Título.

---

CDD 631

## VINÍCIUS BITENCOURT CAMPOS CALOU

### ESTIMATIVA DA BIOMASSA DA CULTURA DO MILHO POR MEIO DE VANT/DRONE

Monografia apresentada ao Curso de Agronomia do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará, como parte das exigências da disciplina Atividade Supervisionada para obtenção do título de Engenheiro Agrônomo.

Aprovada em: 26/01/2016.

#### BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira, Ph.D. (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Luis Clenio Jário Moreira  
Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia – Limoeiro do Norte (IFCE)

---

M.Sc. Odílio Coimbra da Rocha Neto  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

B.Sc. José Adriano da Silva  
Grupo CADIC S.A.

A Deus.

À minha família, que sempre me apoiou  
e incentivou.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Adunias dos Santos Teixeira pela excelente orientação, profissionalismo e dedicação.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. D.Sc Luis Clenio Jário Moreira, M.Sc. Odílio Coimbra da Rocha Neto, B.Sc. José Adriano da Silva pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos amigos do Laboratório de Eletrônica e Máquinas Agrícolas – LEMA e Grupo de Automação, Manejo Agrícola e Desenvolvimento Tecnológico – GAMA-DT, em especial Klênio, Rômulo, David, Amnon, Marcos, Clarissa, Márcia, Eurileny, Seu Carlos.

Ao CNPq pelo apoio financeiro na execução do projeto.

À Universidade Federal do Ceará pelo incentivo a novas pesquisas, estrutura de salas de aula e professores.

À *AgiSoft*, desenvolvedora do *PhotoScan* utilizado neste trabalho.

Ao Grupo CADIC S.A. pela abertura e disponibilidade em auxiliar na pesquisa.

Aos amigos da turma da Agronomia, em especial aos membros do Departamento de Incentivo e Valorização da Agronomia – DIVA.

Aos meus pais Cicero Calou e Maria José, pelo tempo dedicado, confiança e apoio.

À minha irmã Marília pelas orações e em memória de Maria Lídia, minha outra irmã.

“No mundo haveis de ter tribulações,  
mas coragem! Eu venci o mundo”

**Jesus Cristo**

## RESUMO

O desenvolvimento e transferência de novas tecnologias são cruciais para o sucesso econômico do setor agrícola. Atualmente muitos esforços são despendidos para a criação de metodologias e ferramentas para o controle de produtividade, status nutricional e hídrico, aspecto sanitário ou previsão de safras. Neste cenário, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs, em inglês UAV – *Unmanned Aerial Vehicle*), são inseridos de maneira promissora, visto as vantagens da obtenção de imagens aéreas com alta resolução espacial associada ao baixo custo de investimento, em relação aos outros métodos de aquisição. Para tanto, o objetivo principal deste trabalho foi a criação de uma metodologia capaz de estimar com precisão a biomassa de um plantio comercial de milho utilizando imagens aéreas obtidas por VANT, avaliando as etapas de aquisição de imagens, voo programado, processamento com o software *PhotoScan (AgiSoft)*, georreferenciamento das ortofotos e modelos digitais de elevação gerados, além da qualidade da nuvem de pontos. Foram realizados três voos em uma área de irrigação por pivô central na cidade de Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil, em outubro de 2015, utilizando um VANT Phantom 2, da DJI *Inovations*, associados às câmeras GoPro Hero 4 Silver (Fish Eye) e Ricoh GRLENS (Lente plana). Foram realizados dois voos a 60 metros de altura (câmera Ricoh GRLENS e GoPro Hero 4 Silver) e um voo a 30 metros de altura (câmera GoPro Hero 4 Silver), para avaliação do nível de detalhamento dos produtos gerados e qualidade da nuvem de pontos. Paralelamente, foram amostrados oito pontos para a estimativa da biomassa em campo, servindo de validação para as estimativas realizadas através das imagens aéreas. A metodologia proposta mostrou-se precisa para o voo a 30 metros de altura, com valor de biomassa estimada de  $2,97 \text{ kg m}^{-2}$ , muito próximo ao valor estimado em campo de  $2,92 \text{ kg m}^{-2}$ . O processamento com a câmera Ricoh GRLENS mostrou-se o menos efetivo, obtendo  $2,21 \text{ kg m}^{-2}$ , enquanto que o processamento com a câmera GoPro a 60 metros de altura resultou em um valor de biomassa estimada de  $2,72 \text{ kg m}^{-2}$ . Os resultados são promissores, demonstrando que a metodologia pode ser empregada na estimativa da biomassa, previsão de safras e produtividade das lavouras.

**Palavras-chave:** Agricultura de precisão, Veículos Aéreos Não Tripulados, Biomassa do milho, Drone.



## ABSTRACT

The development and transfer of new technologies are crucial to the economic success of the agricultural sector. Currently many efforts are spent to create methodologies for crop yield control, nutritional and hydric status, health aspects or crop forecasting. In this scenario, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), are inserted in a promising way, as the advantages of obtaining aerial images with high spatial resolution associated with low investment cost compared to other methods acquisition. Thus, the main objective was to create a methodology to accurately estimate the biomass of commercial planting of corn using aerial images obtained by UAV, as well as evaluating the steps of image acquisition, scheduled flight, processing with *PhotoScan* software (*AgiSoft*) georeferencing of orthophotos and digital elevation models (DEM) generated, in addition to cloud quality points. Three flights were made in a center pivot sprinkler system area in the city of Limoeiro do Norte, Ceará, Brazil, in October 2015, using two UAVs: Phantom 2 and 3, from DJI Innovations, associated with cameras GoPro Hero 4 Silver and Ricoh GRLENS. There were two flights to 60 meters high (Ricoh GRLENS camera and GoPro Hero 4 Silver) and a flight to 30 meters high (GoPro Hero camera 4 Silver), to assess the level of detail of the products generated and cloud quality points. At the same time we sampled eight points for the estimation of biomass in the field, serving as validation for the estimates made through aerial images. The proposed methodology proved to be need for the flight to 30 meters high, with estimated biomass value of  $2.97 \text{ kg m}^{-2}$ , similar to the estimated field of  $2.92 \text{ kg m}^{-2}$ . Processing with Ricoh GRLENS camera proved less effective, obtaining  $2.21 \text{ kg / m}^2$ , while processing with GoPro camera 60 meters biomass resulted in an estimated value of  $2.72 \text{ kg / m}^2$ . The results are promising, showing that the method can be combined in predicting harvests and crop yields.

**Keywords:** Precision agriculture, Unmanned Aerial Vehicles, Corn biomass.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - A) Kattering Aerial Torpedo; B) MicroVANT Zangão 5 asa fixa, SkyDrones; C) Phantom 2 multirrotor, DJI. ....	16
Figura 2 - A) Esquematização da aquisição de imagens por VANT e a superposição ideal; B) Esquematização do voo de um VANT multirrotor realizando a aquisição de fotos com superposição.....	22
Figura 3 - A) Resolução de uma imagem obtida por meio de VANT a 60 metros de altura; B) a 30 metros de altura; C) Ground Control Point de cerâmica utilizado para este trabalho D) Zoom em uma imagem obtida com VANT a 60 metros de altura e; E) Zoom em uma imagem obtida com VANT a 30 metros de altura; F) Imagem de um dos Ground Control Points a 30 metros de altura.....	23
Figura 4 - Mapa da área de estudos onde foram realizados os voos e amostragens. ....	26
Figura 5 - Foto da área de estudo e imagem do Google Earth do pivô central (datada de 24/03/2014), Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil. ....	27
Figura 6 - A) A) Phantom 2, vista frontal e B) Phantom 2, vista de cima. DJI Inovations. ....	29
Figura 7 - A) Phantom 2 em pleno pouso; B) Phantom 2 em pleno voo, DJI Inovations. ....	29
Figura 8 - Representação da rota de voo dos VANTs na área de estudos, em Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil. Imagens de 24/03/2014, Google Earth. A) Rota do primeiro dia de missão, utilizando o Phantom 2 + câmera Ricoh GRLENS, e B) Rota do segundo dia de missão utilizando o Phantom 2 + GoPro Hero 4 Silver. ....	30
Figura 9 - A) Ponto de controle de campo feito com uma placa de cerâmica de 35 x 35 cm; B) Aquisição da coordenada geográfica dos pontos de controle em campo com GPS R4 Trimble; C) Fotografia aérea obtida com o VANT da área experimental de milho com uma placa de controle de campo. ....	31
Figura 10 - Fluxograma do processamento das imagens aéreas no <i>PhotoScan</i> , da <i>AgiSoft</i> .. ....	33

Figura 11 - Fluxograma da manipulação da nuvem densa de pontos para o cálculo da biomassa..	36
Figura 12 - Ortofoto georreferenciada proveniente do Processamento 1 (Phantom 2 + Ricoh GRLENS), área de cultivo de milho, Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil, 2015.	39
Figura 13 - Ortofoto georreferenciada proveniente do Processamento 2 (Phantom 2 + GoPro Hero 4 Silver), área de cultivo de milho, Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil, 2015.	40
Figura 14 - Ortofotos georreferenciadas provenientes das 3 secções de aproximadamente 1 ha, área de cultivo de milho, Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil, 2015. Sendo A) Processamento 1; B) Processamento 2; C) Processamento 3.	42
Figura 15 - Comparação entre o Nível de detalhamento de duas imagens com a mesma câmara em duas alturas diferentes, sendo A) Processamento 2, 60 metros de altura; B) Processamento 3, 30 metros de altura.	42
Figura 16 - Nuvem densa de pontos (secção de 1 ha) gerada pelo processamento no software PhotoScan. Sendo A) Processamento 1 – Phantom 3; Câmera Ricoh GRLENS 18,3; sobrevoos a 60 metros de altura; B) Processamento 2 – Phantom 2; Câmera GoPro Hero 4 Silver; sobrevoos a 60 metros de altura; C) Processamento 3 – Phantom 2; Câmera GoPro Hero 4 Silver; sobrevoos a 30 metros de altura.	44
Figura 17 - Modelos digitais de elevação gerados pelo software PhotoScan. Sendo A) Processamento 1; B) Processamento 2; C) Processamento 3.	45
Figura 18 - Distribuição e probabilidade de altitudes. A e B) Processamento 1; C e D) Processamento 2; E e F) Processamento 3.	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações dos voos realizados em Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil. ....	32
Tabela 2 - Especificações do tamanho do sensor das câmeras utilizadas e <i>Ground Sampling Distance</i> .. ....	34
Tabela 3 - Valores obtidos da amostragem em campo do milho AG 1051, Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil.. ....	38
Tabela 4 - Erros do georreferenciamento e pontos por metro quadrado das nuvens de pontos provenientes dos processamentos. ....	41
Tabela 5 - Detalhamento das características das nuvens densas de pontos e arquivos pós manipulação em C++. ....	43
Tabela 6 - Altura das plantas nas amostragens realizadas em campo. ....	45
Tabela 7 - Erros de altura provenientes dos dados das nuvens densa de pontos e desvio padrão. ....	46
Tabela 8 - Alturas do teste de probabilidade e identificação dos valores mais frequentes no histograma de alturas. ....	49
Tabela 9 - Resultados obtidos referentes aos dados da nuvem de pontos para o cálculo da biomassa fresca. ....	49
Tabela 10 - Comparação entre os valores de biomassa estimados pelo modelo e a relação com a biomassa real obtida em campo. ....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ANAC	Agência Nacional de Aviação Civil
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EXIF	EXchangeable Image File format
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
GCP	Ground Control Points (Ponto de Controle em solo)
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Position System
GSD	Ground Sampling Distance
IAF	Índice de Área Foliar
ICAO	International Civil Aviation Organization
IMU	Inertial Measurement Unit
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NGRDI	Normalized Green-Red Difference Index
RPA	Remotely Piloted Aircraft
SfM	Structure from Motion
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
VANTs	Veículos Aéreos Não Tripulados
VCANTs	Veículos de Combate Aéreo Não Tripulado

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>16</b>
<b>2.1</b>	<b>Histórico e aplicações dos VANTs/UAV</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>Aquisição dos dados e processamento</b> .....	<b>20</b>
<b>2.3</b>	<b>A cultura do milho (Zea mays)</b> .....	<b>23</b>
<b>2.4</b>	<b>Biomassa</b> .....	<b>24</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
<b>3.1</b>	<b>Área de estudo</b> .....	<b>26</b>
<b>3.2</b>	<b>Amostragem do material vegetal</b> .....	<b>27</b>
<b>3.3</b>	<b>Plataforma e voo programado</b> .....	<b>28</b>
<b>3.4</b>	<b>Processamento dos dados</b> .....	<b>32</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>38</b>
<b>4.1</b>	<b>Dados da amostragem convencional em campo</b> .....	<b>38</b>
<b>4.2</b>	<b>Ortofotos e georreferenciamento</b> .....	<b>38</b>
<b>4.3</b>	<b>Nuvem densa de pontos e Modelo Digital de Elevação</b> .....	<b>42</b>
<b>4.4</b>	<b>Teste de probabilidade e distribuição de alturas</b> .....	<b>46</b>
<b>4.5</b>	<b>Comparação entre biomassas</b> .....	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>51</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>52</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>53</b>
	<b>APÊNDICE A – RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO 1</b> .....	<b>64</b>
	<b>APÊNDICE B – RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO 2</b> .....	<b>69</b>
	<b>APÊNDICE C – RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO 3</b> .....	<b>74</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios da humanidade para este século é produzir alimentos em quantidade suficiente para suprir a demanda da população mundial. A agricultura de precisão, desta maneira, é considerada uma das maiores promessas para o desenvolvimento de tecnologias que contribuam para o sucesso das atividades agrícolas, onde o monitoramento das lavouras, estimativas de rendimento e de produtividade, identificação de pragas e doenças, estão relacionados ao conjunto de informações que torna a agricultura como atividade empresarial menos arriscada e mais rentável. O desenvolvimento no campo é consequência destes esforços para se alcançar melhores resultados, os quais contribuirão definitivamente para o sucesso da agropecuária no planeta (GARNETT *et al.*, 2013).

Neste contexto, os veículos aéreos não tripulados (VANTs) estão sendo empregados como uma tecnologia promissora no monitoramento das lavouras para identificação de pragas e doenças, deficiências nutricionais, déficit hídrico, previsão de safras, monitoramento da erosão do solo (ZHANG, KOVACS, 2012). Diversas aplicações para os VANTs vêm sendo desenvolvidas ao longo dos anos, possibilitando uma expansão no mercado e demanda por serviços. Os benefícios em curto prazo destas tecnologias já são notados, e contribuem positivamente para o setor agrícola. Tais mecanismos utilizam ferramentas poderosas na aquisição de imagens aéreas com alta resolução espacial e custos relativamente mais baixos, comparados a outros métodos (HONKAVAARA *et al.*, 2013).

A cultura do milho se destaca por ser largamente cultivada e consumida em todo o planeta, sendo alimento rico no ponto de vista nutricional, utilizado para alimentação humana e animal. As informações a respeito do status hídrico, nutricional e sanitário são importantes para as tomadas de decisões dentro de um conjunto de fatores econômicos, sendo determinantes para o resultado final da atividade. A pós-colheita e comercialização do milho adentram no conjunto de atividades finais de um plantio comercial, envolvendo a logística da operação, armazenagem, prazos, preços, marketing (DOMINGUES *et al.*, 2013).

A biomassa, neste panorama, é um indicador de produtividade, enquadrando-se como mais uma informação pertinente para o auxílio nas tomadas de decisões. O volume do material vegetal estimado em lavouras de milho é importante para questões

de logística, sendo utilizado para estimar a quantidade de caminhões necessários para realizar o escoamento da produção ou quantos silos de armazenagem são possíveis encher. Com a informação da massa fresca da lavoura ainda é possível estimar quantas unidades animais (UA) poderão ser alimentadas, por qual período será possível alimentar um rebanho, ou programação de venda e previsão de preços. (DEMURA; YE, 2010).

Assim, buscou-se neste trabalho o desenvolvimento de uma metodologia capaz de estimar a biomassa da cultura do milho, através de imagens obtidas por meio de VANTs, utilizando princípios de fotogrametria e sensoriamento remoto, além de avaliar as etapas de aquisição de imagens, voo programado, processamento com o software *PhotoScan* (AgiSoft), georreferenciamento das ortofotos e modelos digitais de elevação gerados, a qualidade da nuvem de pontos, bem como as câmeras utilizadas (GoPro Hero 4 Silver – fish eye e Ricoh GRLENS – plana).



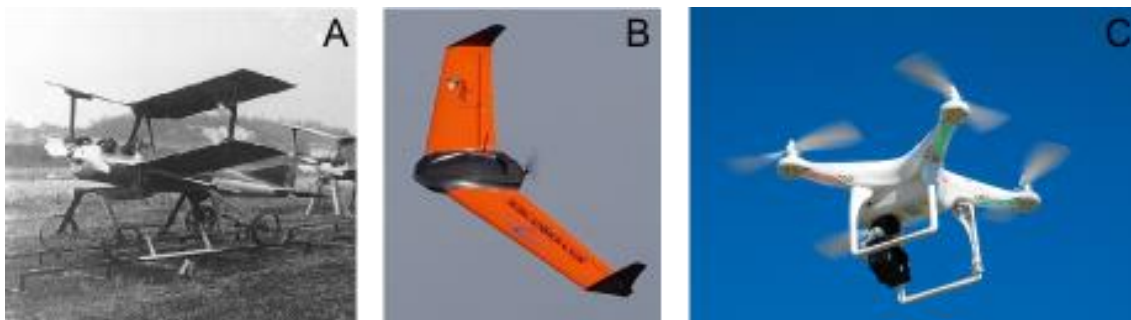
## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Neste tópico será abordada de maneira sucinta e objetiva uma revisão bibliográfica acerca do histórico e aplicações dos veículos aéreos não tripulados – VANTs, bem como alguns conceitos sobre fotogrametria e aquisição de imagens aéreas, além de uma breve revisão sobre o cálculo de biomassa na cultura do milho. Buscou-se, desta maneira, contribuir para a integração dos trabalhos mais importantes relacionados ao tema, introduzindo conceitos que ajudarão a compreender a metodologia e resultados obtidos. Espera-se contribuir com o avanço dos conhecimentos acerca dos VANTs associados principalmente à agricultura de precisão.

### 2.1 Histórico e aplicações dos VANTs/UAV

A história da aviação mundial é continuamente marcada pelos avanços tecnológicos. Grande parte da tecnologia atualmente conhecida é decorrente de uma demanda bélica envolvendo conflitos armados no curso da história da humanidade. Neste contexto, os veículos aéreos não tripulados (VANTs, derivação da língua inglesa *UAV – Unmanned Aerial Vehicle*) surgiram como uma resposta às necessidades da indústria armamentista, sendo utilizados no mapeamento de áreas estratégicas, reconhecimento de terrenos e identificação de alvos, ou até mesmo em ataques aéreos, como o *Kettering Aerial Torpedo*, o primeiro VANT usado para combates, em 1918. Neste período, porém, os VANTs eram imprecisos na coleta de informações e suas aplicações não tiveram reconhecimento por muitos militares e líderes políticos. Na Figura 1 abaixo, são ilustrados alguns veículos aéreos não tripulados (VALAVANIS, 2008; FAHLSTROM; GLEASON, 2012).

Figura 1 – A) *Kattering Aerial Torpedo*; B) MicroVANT Zangão 5 asa fixa, SkyDrones; C) Phantom 2 multirotor, DJI.



Fonte: <http://doctordrone.com.br/> (2015).

Segundo Glade (2000), o Departamento de Defesa dos Estados Unidos definiu os VANTs como aeronaves que não possuem um piloto a bordo, podendo ser pilotadas remotamente por operadores humanos ou guiados por programas computacionais. São comumente chamados de “drones”, mas também podem assumir outras denominações, como no caso dos veículos de combate aéreo não tripulado – VCANTs, ou *Remotely Piloted Aircraft* – RPA (BRASIL, 2015). A Agência Nacional de Aviação Civil – ANAC – confirma tal definição, excluindo da categoria os balões tradicionais por não ser possível o seu controle nos três eixos, além dos aeromodelos, por serem destinados para recreação.

Os VANTs podem ainda ser classificados em categorias que dizem respeito ao design de voo, podendo ser multirrotor ou asa fixa. Lucieer *et al.* (2014) e Mattiello *et al.* (2015) apontam algumas vantagens que o sistema multirrotor apresenta em relação ao sistema de asa fixa, como a possibilidade de manter-se em posição estática no ar, voar a baixas velocidades e possuir uma aterrissagem mais suave. A principal desvantagem deve-se ao fato da autonomia de voo ser menor que os VANTs de asa fixa, por conta da baixa aerodinâmica.

O mercado dos veículos aéreos não tripulados está em constante expansão, apresentando-se como uma nova tendência a ser explorada. As diversas aplicações, bem como os diversos modelos, podem ser empregados adaptando-se à demanda de cada profissional, de cada região (WONG, 2001). Os VANTs quando comparados a outros sistemas de aquisição de imagens aéreas, como fotogrametria por aviões e satélites, possuem algumas vantagens, como destacam Honkavaara *et al.* (2013), citando a capacidade do sistema em adquirir dados com resolução espacial e temporal desejadas. O custo benefício é outro fator vantajoso, pois os VANTs oferecem uma boa relação entre custo e eficiência, comparado com outros métodos de aquisição. Outro fator destacado pelos autores é o emprego dos VANTs inclusive sob condições de nebulosidade. Tamminga *et al.* (2015) apontam o baixo custo, alta eficiência, flexibilidade operacional e resolução espacial centimétrica. A facilidade no tratamento e processamento dos dados coletados está relacionada com a interface e fluxo de trabalho de cada software disponível no mercado. Atualmente os preços dos softwares ainda se revelam uma desvantagem, visto que, para aquisição de uma licença anual, o custo gira em torno de 3,5 mil dólares.

O campo de atuação dos VANTs por muitos anos ficou restrito a aplicações militares, entretanto, recentemente, aplicações civis têm recebido grande ênfase. Atualmente são inúmeras as aplicações dos VANTs. O desenvolvimento tecnológico possibilitou a evolução dos modelos passados para robustos e precisos sistemas atuais. Na última década, pesquisadores de diversas áreas testaram e comprovaram a eficiência dos VANTs para variados fins, como controle do trânsito, contagem eficiente de veículos e apoio de equipes em solo em eventuais acidentes (DOHERTY, 2004; HAARBRINK; KOERS, 2006; PURI; VALAVANIS; KONTITSIS, 2007); Aplicações para o monitoramento, documentação, reconstrução de edificações históricas e sítios arqueológicos de difícil acesso (RUBIO *et al.*, 2005; EISENBEISS; ZHANG, 2006; ÇABUK; DEVECI; ERGINCAN, 2007); Medição do fluxo de dióxido de carbono de erupções vulcânicas (MCGONIGLE *et al.*, 2008) e monitoramento das atividades vulcânicas (AMICIS *et al.*, 2013); Identificação de incêndios e apoio no monitoramento de queimadas (CASBEER *et al.*, 2005; RESTAS, 2006; MAZA *et al.*, 2011; MERINO *et al.*, 2012); Aplicação pioneira no monitoramento do degelo no Himalaia através de mapas de elevação gerados a partir da coleta de dados utilizando VANTs (IMMERZEEL *et al.*, 2014); Identificação e monitoramento de vegetação subaquática em rios (FLYNN; CHAPRA, 2014).

Paralelamente a estas aplicações, a agricultura de precisão também contribuiu para o desenvolvimento e aplicações de tecnologias no campo pelo uso dos VANTs. Hunt Jr. *et al.* (2005) buscaram correlacionar o teor de nitrogênio em plantas de milho com um índice calculado a partir da reflectância das bandas verde e vermelha, (*Normalized Green-Red Difference Index - NGRDI*), onde não obtiveram nenhuma correlação, apesar dos tratamentos com baixas doses de nitrogênio serem facilmente identificados pelas imagens aéreas. Estudaram também a relação do NGRDI com a biomassa de plantas de milho, alfalfa e soja, onde encontraram uma correlação linear para valores de biomassa abaixo de  $120 \text{ g.m}^{-2}$ . Lelong *et al.* (2008) foram adiante, buscando analisar a relação entre o índice de área foliar e o *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), utilizando as câmeras Canon EOS 350D e Sony DSC-F828, onde encontraram coeficientes de correlação acima de 0,80. Nebiker *et al.* (2008) demonstraram o grande potencial da associação de sensores multiespectrais e VANTs para a agricultura, destacando a alta resolução espacial alcançada e os custos relativamente menores em relação a outros métodos de aquisição de imagens aéreas.

Hunt Jr. *et al.* (2010) testaram duas variedades de trigo no segmento de monitoramento de culturas agrícolas, associando o índice de área foliar com o GNDVI (*Green Normalized Difference Vegetation Index*), encontrando alta correlação.

Remondino *et al.* (2011) inauguraram a segunda década dos anos 2000 discursando sobre as perspectivas futuras da utilização de VANTs conjugados a softwares de geração de mapas 3D a partir da sobreposição de imagens aéreas. Baluja *et al.* (2012), Zarco-Tejada, González-Dugo, Berni (2012) e Bellvert *et al.* (2014) relacionaram câmeras termais e multiespectrais a VANTs, buscando a correlação entre a temperatura e o teor de água em plantações. No segmento da conservação e manejo do solo, d'Oleire-Oltmanns *et al.* (2012), buscaram o monitoramento da erosão do solo a partir de um modelo digital de terreno gerado a partir das imagens capturadas por um VANT de asa fixa. Calderón *et al.* (2013) utilizaram um VANT associado a sensores multiespectrais e termais para a identificação de fungos em um plantio de oliveira. Bending (2014) utilizou técnicas de sensoriamento remoto em consórcio com os VANTs para buscar um método eficiente de estimativa da biomassa e da altura de plantas, acompanhando e monitorando um cultivo de cevada e arroz. Shahbazi *et al.* (2015) buscaram desenvolver e avaliar o sistema de um VANT, incluindo hardware e software conjugados para um mapeamento de alta precisão e geração de modelo 3D. Feng, Liu e Gong (2015) obtiveram resultados satisfatórios ao mapear a vegetação de uma área urbana e classificar os diferentes tipos de cobertura na superfície.

No Brasil, o sensoriamento remoto voltado à área de aplicação dos veículos aéreos não tripulados teve sua explosão na segunda década dos anos 2000, com Silva *et al.* (2011) discursando sobre o panorama atual e as perspectivas futuras de aplicações dos VANTs, além de dar relevância ao monitoramento ambiental e de atividades ilícitas de exploração da floresta Amazônica. Pegoraro e Philips (2011) realizaram uma revisão acerca da aplicação dos VANTs além de proporem uma aplicação para o cadastro territorial. Favarin *et al.* (2013) comprovaram a possibilidade da utilização de VANTs para aplicações florestais, possibilitando a contagem e mensuração da área das copas com precisão e, no mesmo período, Roig *et al.* (2013) realizaram uma aplicação para o estudo de aporte de sedimentos em rios.

No ano de 2015 o Congresso Brasileiro de Sensoriamento Remoto contou com mais de 20 trabalhos sobre a temática do uso de VANTs, sendo o mais importante

encontro na área do sensoriamento remoto no Brasil. São destacadas as aplicações para uma modelagem digital do terreno e avaliação dos dados de alta resolução espacial (ALMEIDA *et al.*, 2015); planejamento urbano (ANTUNES; HOLLATZ, 2015); detecção de defeitos em pavimentos (BRANCO; SEGANTINE, 2015); estimativa da cobertura verde em pastagens (BRITO *et al.*, 2015); georreferenciamento utilizando fotogrametria aérea de VANTs (GOMES *et al.*, 2015); fiscalização do uso de recursos hídricos (SILVA *et al.*, 2015).

## 2.2 Aquisição dos dados e processamento

O planejamento da missão é realizado com base na finalidade da coleta de dados, definindo o objetivo, objetos de estudo e definição da área. O planejamento de voo e a realização do voo em piloto automático são realizados por meio de softwares do tipo *Ground Control Station*, como o *Ground Station*, produzido pela *DJI, Innovations* ou o *Mission Planner* produzido pela *3DRobotics*. Nestes softwares é possível definir com elevada precisão parâmetros como altura de voo, superposição das imagens, velocidade de voo e área sobrevoada (SZ DJI Technology Co., Ltd).

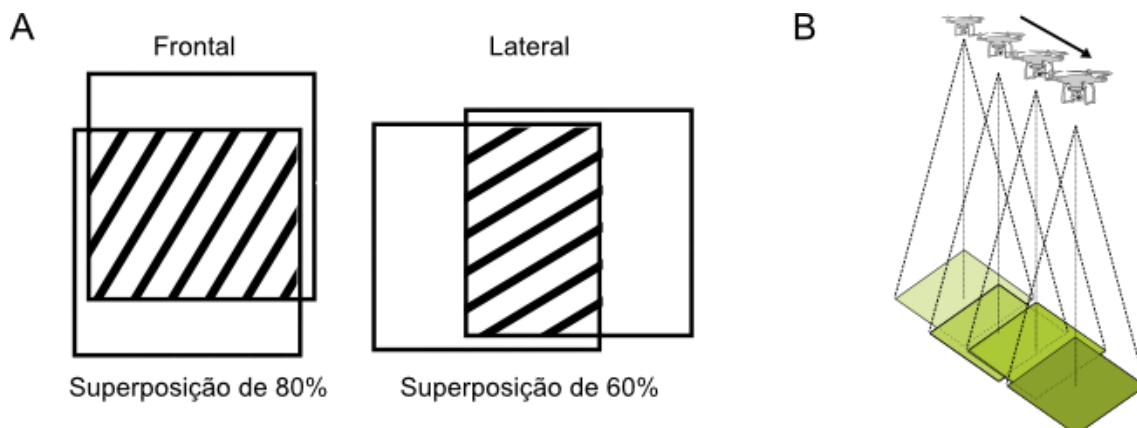
Para o processamento das imagens adquiridas no voo são utilizados softwares específicos. Diferentes empresas têm ofertado no mercado tais softwares com ferramentas destinadas ao processamento de imagens obtidas por VANTs, os quais possuem funções de gerar dados espaciais em 3D para utilização em plataformas SIG (Sistemas de Informação Geográfica), modelos digitais de terreno e de elevação, geração de ortofotos georreferenciadas, medições de área e volume (AGISOFT, 2013; PIX4DMAPPER, 2015). Alguns exemplos destas empresas são a *AgiSoft*, desenvolvedora do *PhotoScan*; *Pix4Dmapper*, desenvolvido pela *Pix4D*; *MicMac*, da IGN.

Uma das funções mais interessantes dos softwares disponíveis no mercado é a construção de modelos tridimensionais a partir de informações bidimensionais, onde o princípio fotogramétrico é desenvolvido pela superposição de imagens (ROBERTSON; CIPOLLA, 2009). Os softwares fazem uso de algoritmos, como o *Structure From Motion* (SfM) (ULLMAN, 1979), que é capaz de reconhecer padrões em fotografias sobrepostas capturadas por uma câmera em movimento em torno de uma cena e alinhá-las. O algoritmo detecta e descreve a característica ou padrão local para cada ponto 2D, fazendo o procedimento para cada imagem onde o padrão é encontrado (QUAN, 2010;

FISHER *et al.*, 2013;). Diversos autores realizaram trabalhos que descrevem a estrutura e aplicação do SfM, como Verhoeven *et al.* (2012) buscando uma metodologia rápida e eficaz para o georreferenciamento de fotografias aéreas; reconstrução topográfica com alta resolução (MANCINI *et al.*, 2013); Gomez (2014) realizou uma investigação do potencial do SfM para a fotogrametria; Moutinho *et al.* (2015) realizaram uma comparação de ortofotos geradas em três diferentes softwares que utilizam o SfM. Como produto deste alinhamento utilizando o algoritmo SfM, tem-se a nuvem esparsa de pontos, que é um modelo 3D com um nível de detalhamento razoável (GOESELE *et al.*, 2007; MURTIYOSO; SUWARDHI, 2011).

Para uma eficiente sobreposição de imagens aéreas e elevado padrão de reconhecimento pelos algoritmos computacionais é recomendado que a superposição das imagens aéreas seja de 60% lateral e 80% frontal, no mínimo (AGISOFT,2013). Na Figura 2 é esboçado um esquema de representação do voo de um VANT e a obtenção de fotografias com superposição. Haala, Cramer e Rothermel (2013) e Dandois, Olano e Ellis (2015) constataram ótima qualidade dos resultados com sobreposições acima de 80%. A altura de voo é outro parâmetro que tem influência direta sobre a qualidade e nível de detalhamento das imagens, pois está relacionada com o tamanho do pixel na imagem. Quanto maior a altura de voo, menor o nível de detalhamento de uma imagem e maior o tamanho do pixel, também chamado de *Ground Sampling Distance* (GSD). Quanto menor o GSD, maior será a resolução espacial e maior será o nível de detalhamento de uma imagem ou modelo gerado (ZARCO-TEJADA *et al.*, 2014). Na Figura 3 são ilustrados os detalhes da resolução espacial de imagens obtidas com VANT em duas alturas diferentes.

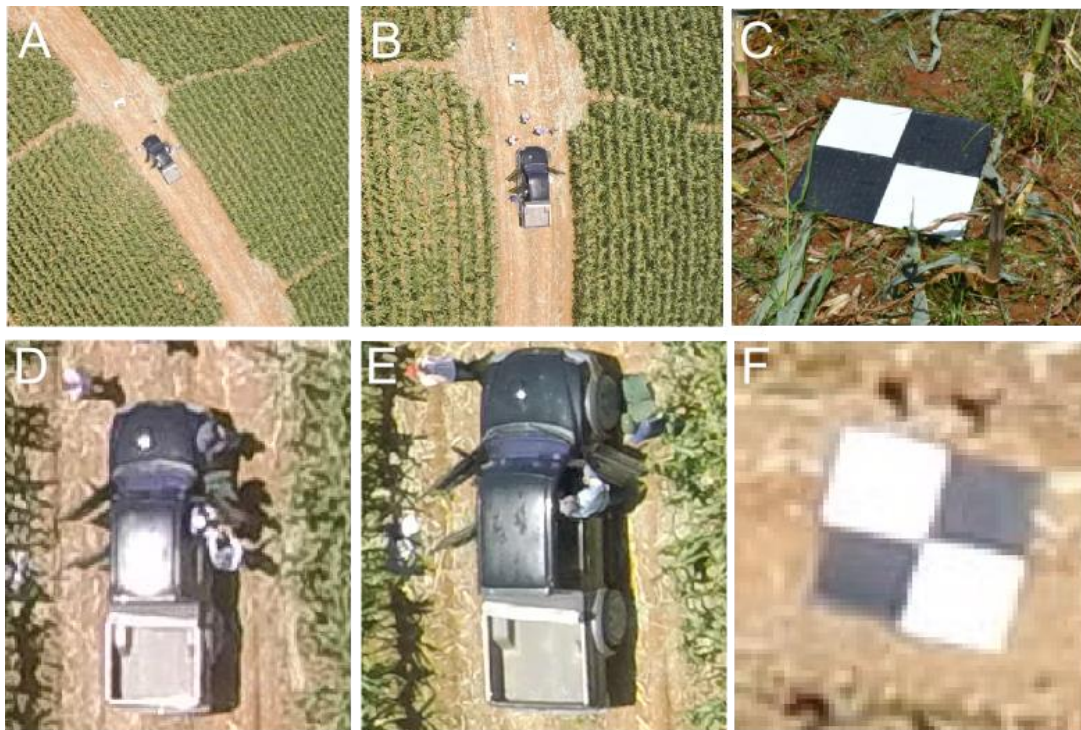
Figura 2 – A) Esquemática da aquisição de imagens por VANT e a superposição ideal; B) Esquemática do voo de um VANT multirrotor realizando a aquisição de fotos com superposição.



Fonte: Autor (2015).

Para realizar um correto georreferenciamento normalmente são utilizados pontos de controle em campo (*Ground Control Points - GCP*) com coordenadas conhecidas. Na Figura 3 é demonstrado um exemplo de um ponto de controle utilizado neste trabalho. Atualmente existem câmeras que já fazem a coleta dos dados geográficos juntamente com as imagens gerando arquivos do tipo EXIF (*EXchangeable Image File format*) (FAN *et al.*, 2011), o que torna o alinhamento e processamento do algoritmo SfM mais rápido. Cada câmera possui parâmetros que devem ser calibrados antes da realização dos processamentos, para que, deste modo, uma composição métrica verdadeira seja realizada, resultando na compatibilidade entre valores virtuais e reais. O processo de calibração é realizado com base em um modelo matemático para estimar as distorções e parâmetros internos (CASSEMIRO; PINTO, 2014). Normalmente os parâmetros reconhecidos são a distância focal ( $f_x$ ,  $f_y$ ), as coordenadas do ponto principal de cada imagem ( $c_x$ ,  $c_y$ ), coeficiente de inclinação (*Skew*), coeficientes de distorção radial ( $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  e  $k_4$ ), coeficientes de distorção tangencial ( $p_1$ ,  $p_2$ ) (AGISOFT, 2013).

Figura 3 – A) Resolução de uma imagem obtida por meio de VANT a 60 metros de altura; B) a 30 metros de altura; C) *Ground Control Point* de cerâmica utilizado para este trabalho D) Zoom em uma imagem obtida com VANT a 60 metros de altura; E) Zoom em uma imagem obtida com VANT a 30 metros de altura e; F) Imagem de um dos *Ground Control Points* a 30 metros de altura.



Fonte: Autor.

### 2.3 A cultura do milho (*Zea mays*)

O monitoramento das lavouras, as estimativas de rendimento e de produtividade e a identificação de pragas e doenças estão, desta forma, relacionados ao conjunto de informações que torna a agricultura uma atividade empresarial menos arriscada e mais rentável. O desenvolvimento no campo é consequência destes esforços para se alcançar melhores resultados, os quais contribuirão definitivamente para o sucesso econômico da agropecuária no planeta. Desta forma, a cultura do milho se destaca, uma vez que é um dos cereais mais importantes da humanidade por seu alto valor nutritivo, sendo largamente plantado, comercializado e consumido em todo o planeta.

Segundo dados da FAO (2013), a produção mundial de grãos ultrapassou um bilhão de toneladas em 2013, sendo o continente americano responsável por 53% do total produzido. O Brasil se encontra na terceira colocação, atrás de Estados Unidos e China, produzindo cerca de 75,6 milhões de toneladas de grãos de milho em 2013. Para a safra de 2014/2015, estimativas da Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB



demonstram que a produção alcançará patamares equivalentes a 84,3 milhões de toneladas em aproximadamente 15,7 milhões de hectares em todo o território brasileiro.

De acordo com a CONAB, para a safra 2014/2015, a produtividade média brasileira de grãos registrou 3.614 kg ha<sup>-1</sup>, sendo o centro-sul do país o responsável por elevar os valores médios de produtividade, alcançando 3.904 kg ha<sup>-1</sup>. Por outro lado, a região norte-nordeste encontra-se com valores de produtividade abaixo da média brasileira, com 2.328 kg ha<sup>-1</sup>. Neste panorama, a produtividade média do estado do Ceará foi de apenas 270 kg ha<sup>-1</sup> na safra 2014/2015, reduzindo 56,4% em valores comparativos com a safra de 2013/2014. Tais variações são resultados da crise hídrica instaurada por causa da falta de chuvas, prejudicando a produção agrícola (EMBRAPA, 2015).

Além dos grãos, as folhas e o colmo do milho são aproveitados para alimentação animal, visto o seu grande potencial nutricional, podendo ser fornecidos frescos ou submetidos a processo de ensilagem. A produtividade de massa fresca de milho é variável em função da variedade adotada, disponibilidade de água durante o ciclo da cultura, nutrição e sanidade. Este fato torna a produtividade de massa fresca de milho bastante variável, podendo ser observados valores entre 11 e 35 t ha<sup>-1</sup> (MELLO *et al.*, 2010).

## **2.4 Biomassa**

A biomassa dos materiais vegetais está diretamente relacionada com a produtividade das lavouras, mostrando-se um fator importante para a estimativa do rendimento da atividade agrícola. Muitos pesquisadores buscaram demonstrar a relação entre a reflectância da luz dos vegetais (alvos) e os parâmetros biofísicos destes, como índice de área foliar, biomassa e status hídrico (COHEN *et al.*, 2003).

Na definição de Lillesand, Kiefer e Chipman (2008), o sensoriamento remoto é definido como sendo o conjunto de técnicas de obtenção de informações de um alvo ou fenômeno sem um contato físico com ele, apresentando-se como uma vantagem em relação aos métodos convencionais destrutivos de campo para a estimativa da biomassa. A aquisição de dados remotos é realizada com o auxílio de sensores capazes de capturar a reflectância da superfície de alvos, segmentando o espectro eletromagnético (ZHANG *et al.*, 2011). Diver

Os pesquisadores buscaram avaliar a possibilidade de estimativa da biomassa por técnicas de sensoriamento remoto (DUBAYAH *et al.*, 2010; SUN *et al.*, 2011; FASSNACHT *et al.*, 2014; LATIFI *et al.*, 2014; LAURIN *et al.*, 2014; TANASE *et al.*, 2014; WANI; JOSHI; SINGH, 2014), apresentando métodos envolvendo sensores ativos, como *Radio Detection And Ranging (RADAR)* e *Light Detection And Ranging (LiDAR)*, além de sensores ópticos.

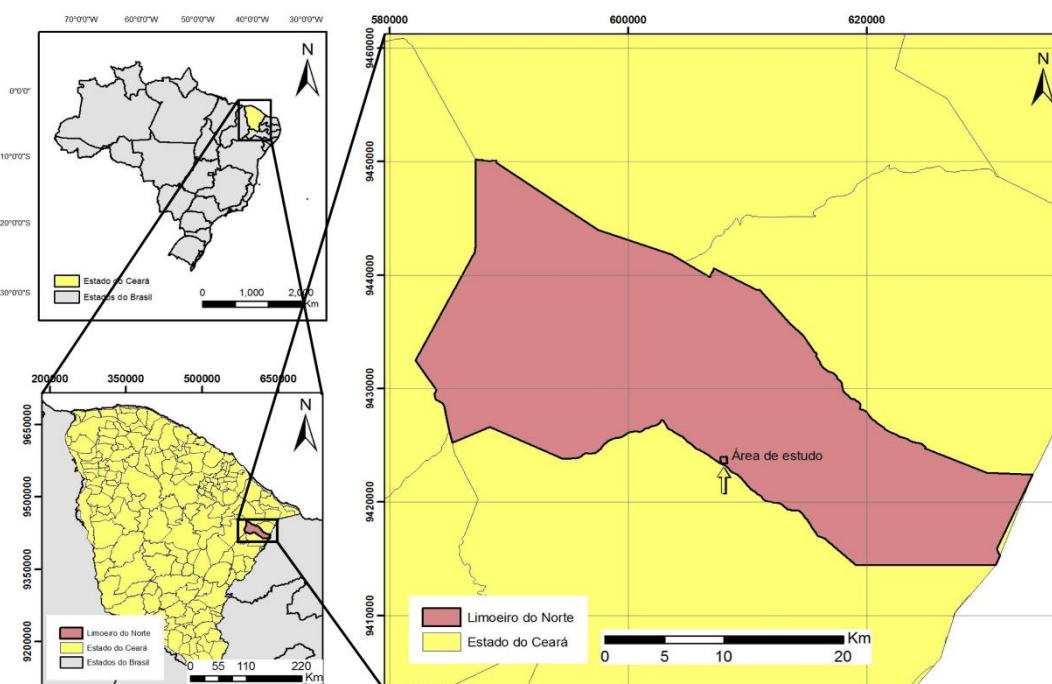
Os modelos adotados para obter informações precisas do índice de área foliar e estimativa da biomassa basicamente partiram da conjugação de sensores multiespectrais aos VANTs (SWAIN, THOMSON, JAYASURIYA, 2010; BENDIG 2014; JANNOURA *et al.*, 2015.). A relação entre bandas espectrais para o cálculo de índices (*NDVI*, *GNDVI*, *IAF*) muito se concatena com as características das lavouras, de eficácia estatisticamente comprovada. Bendig (2014) propôs uma metodologia para a estimativa da biomassa utilizando VANTs, realizando um mapeamento da área plantada antes da semeadura (cevada) para a construção de um modelo da superfície do solo. Foram realizados voos durante todo o ciclo da cultura e comparados com o modelo basal do solo descoberto. Os modelos com a vegetação foram subtraídos ao modelo do solo para a obtenção da altura das plantas e correlacionados com a biomassa, através de modelo de regressão para treinar um algoritmo para o cálculo da biomassa.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

O trabalho foi realizado em uma área de plantio comercial de milho (AG 1051, Agroceres®) com 100 hectares irrigados por pivô central, na cidade de Limoeiro do Norte, Ceará, geograficamente a 5°12,771' de latitude sul e 38°1,388' de longitude oeste, distante 198 km de Fortaleza, a capital do estado (Figura 4 e 5). O milho AG1051 é indicado para silagem da planta inteira e colheita do milho verde. Possui porte alto e ciclo semiprecoce (75 dias), uma espiga por planta e alto rendimento para silagem. O espaçamento adotado foi de 0,8 x 0,3m, resultando em uma densidade de 42 mil plantas por hectare, com altura de dossel média de 2,2 metros. A missão ocorreu no período da colheita, aos 74 dias.

Figura 4 – Mapa da área de estudos onde foram realizados os voos e amostragens.



Fonte: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística e Google Earth (2015).

As condições climáticas estavam favoráveis para a realização da missão, com poucas nuvens, nenhum risco de chuva e boa luminosidade. A área tem um histórico de cultivo de milho sendo voltado principalmente para venda da espiga verde e ensilagem das plantas. Outros pivôs estão instalados próximos à área de estudos voltados principalmente para pastagens ou para a cultura do milho e feijão.

Figura 5 - Foto da área de estudo e imagem do Google Earth do pivô central (datada de 24/03/2014), Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil.



Fonte: Autor (2015).

### 3.2 Amostragem do material vegetal

Para validação, foi coletado material vegetal em toda a área, de forma aleatória. Realizou-se um total de oito amostragens de 1m<sup>2</sup>. O material vegetal foi ensacado em campo e pesado em laboratório. Em seguida, o material foi cortado e medido o volume com o auxílio de um balde volumétrico de 20 litros. O material foi para a estufa de circulação forçada durante 72 horas até peso constante e pesado novamente, para a obtenção do peso seco do material. Este volume medido foi denominado de Volume de Silo, sendo utilizado para comparação entre os valores de volume obtidos na literatura.

A biomassa fresca é obtida pela relação entre do peso fresco da amostra vegetal e a área na qual foi amostrada. Sua importância decorre do fato de ser um indicador de rendimento da cultura e, no caso do plantio de culturas para silagem, é informação para a logística da operação no que diz respeito à quantidade de caminhões necessários para o corte e transporte do material ou ao tamanho do silo para armazenamento.

Fora determinados a Densidade de Silo (Ds), Densidade do Dossel (Dd), Biomassa Fresca (Bf) e Biomassa Seca (Bs), dadas pelas equações abaixo. A informação de volume do milho picado (volume de silo) foi importante para a obtenção do volume total de milho picado da área.

$$D_s = \frac{M_f}{V_s} \quad (1)$$

Em que:

$D_s$  = Densidade de Silo ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$M_f$  = Massa Fresca do milho (kg);

$V_s$  = Volume do milho picado ( $\text{m}^3$ ).

A densidade do dossel foi calculada para posteriormente ser multiplicada ao volume encontrado pelo processamento dos pontos, assim resultando na massa total da área de milho.

$$D_d = \frac{M_f}{A \times H} \quad (2)$$

Em que:

$D_d$  = Densidade do Dossel ( $\text{kg m}^{-3}$ );

$M_f$  = Massa Fresca do milho (kg);

$A$  = área de uma unidade de amostragem ( $1\text{m}^2$ );

$H$  = Altura média das plantas dentro da amostragem de  $1\text{m}^2$ .

$$B_f = \frac{M_f}{A} \quad (3)$$

Em que:

$B_f$  = Biomassa Fresca ( $\text{kg m}^{-2}$ );

$$B_s = \frac{M_s}{A} \quad (4)$$

Em que:

$B_s$  = Biomassa Seca ( $\text{kg m}^{-2}$ );

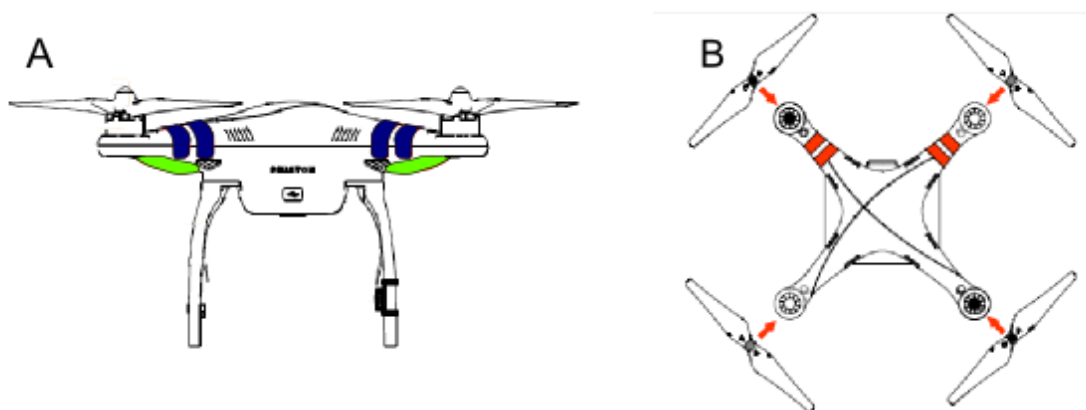
$M_s$  = Massa Seca do milho (kg);

### 3.2 Plataforma e voo programado

Utilizou-se um veículo aéreo não tripulado (VANT), fabricados pela *DJI Innovations*: Phantom 2 (Figuras 6 e 7). A linha Phantom está categorizada dentro dos veículos multirrotores (Quadrirrotor), com autonomia de voo aproximada de 15 minutos (Bateria com capacidade de 5200mAh e tensão de 11.1V). Os comandos de voo são

realizados nos três eixos, podendo ser para frente e para trás (*Pitch*), direita e esquerda (*Roll*), para cima e para baixo (*Elevator*) e rotação no próprio eixo para direita e esquerda (*Yaw*). A plataforma do VANT possui um sistema embutido denominado *Inertial Measurement Unit* (IMU) que possibilita o controle da altitude através de um sensor de inércia e um altímetro barométrico. O sistema *Compass* realiza a leitura da informação geomagnética com o auxílio do GPS (*Global Position System*) aumentando a acurácia do cálculo da posição e altura do VANT. O Phantom também possui um sistema de estabilização da câmera (*Gimbal*) denominado *Zenmuse H3-3D*, que auxilia na qualidade das imagens ou vídeos obtidos da plataforma durante o voo.

Figura 6 – A) Phantom 2, vista frontal e B) Phantom 2, vista de cima. DJI Inovations.



Fonte: Manual de instruções Phantom, DJI Inovations (2015).

Figura 7 – A) Phantom 2 em pleno pouso; B) Phantom 2 em pleno voo, DJI Inovations.



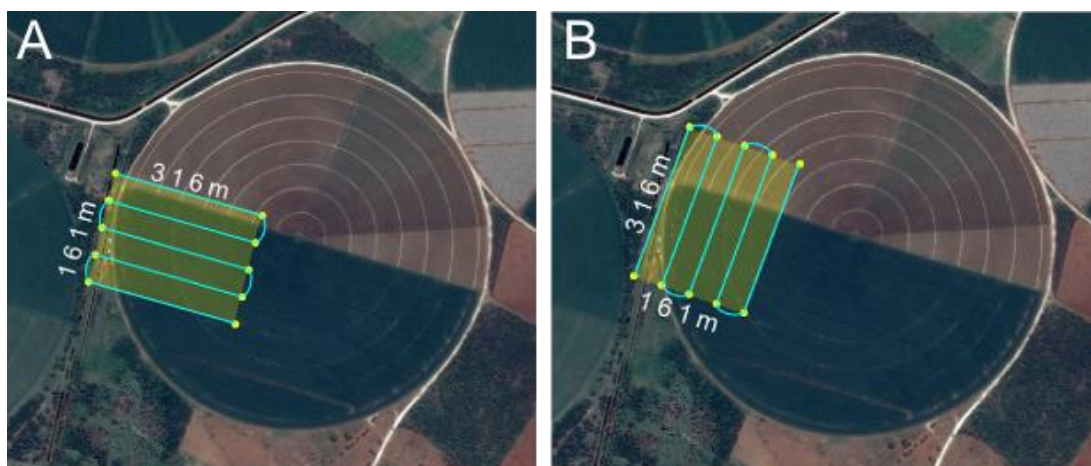
Fonte: Autor (2015).

Por razões de segurança, os veículos aéreos estão submetidos a regulamentações de acordo com leis do espaço aéreo de cada país. As limitações de segurança incluem altura e largura de áreas sobrevoadas.

A Organização Internacional de Aviação Civil (*International Civil Aviation Organization – ICAO*) categoriza em sete classes (classe A até G) as aeronaves, nos quais os VANTs utilizados neste trabalho estão incluídos na classe G. Estas especificações variam de acordo com cada país e regulamentam a área de atuação de voo de cada aeronave.

A definição da área do voo foi estabelecida em campo com o auxílio do software *Ground Station*, onde foi possível programar o voo do VANT, definir a altura desejada e a velocidade de voo (Figura 8). Ambos os voos cobriram uma área de aproximadamente 5,1ha (161m x 316m) com uma velocidade constante de 5m/s. Ao chegar a cada vértice da rota de voo, o VANT executa uma manobra denominada *Stop and Turn*, que se configura em um giro em seu próprio eixo antes de se encaminhar para o ponto seguinte.

Figura 8 – Representação da rota de voo dos VANTs na área de estudos, em Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil. Imagens de 24/03/2014, Google Earth. A) Rota do primeiro dia de missão, utilizando o Phantom 2 + câmera Ricoh GRLENS, e B) Rota do segundo dia de missão utilizando o Phantom 2 + GoPro Hero 4 Silver.

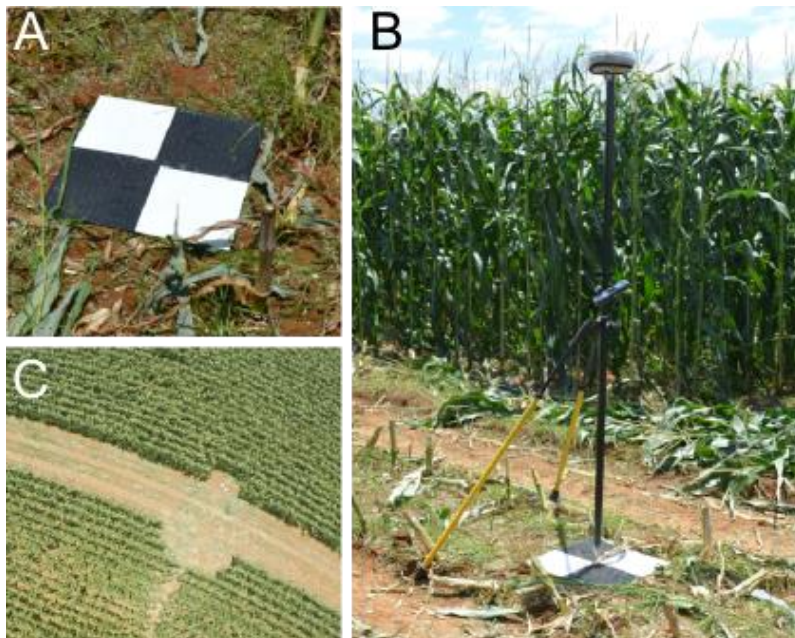


Fonte: Google Earth e elaboração do autor (2015).

Distribuiu-se na área de estudo nove placas de controle, feitas de cerâmica, utilizadas para realizar o georreferenciamento do modelo digital. Obteve-se as

coordenadas de cada placa de controle utilizando sistemas GNSS Trimble® R4 e ProMark3 Magellan®, com precisão milimétrica, respectivamente no primeiro e segundo dia da missão (Figura 9). As bases dos dois GPS foram instaladas no mesmo ponto para os dois dias da missão e o tempo para a aquisição das coordenadas em cada ponto foi de dez minutos. O pós-processamento dos dados do ProMarker3 foi realizado pelo software GNSS Solutions®.

Figura 9 – A) Ponto de controle de campo feito com uma placa de cerâmica de 35 x 35 cm; B) Aquisição da coordenada geográfica dos pontos de controle em campo com GPS R4 Trimble; C) Fotografia aérea obtida com o VANT da área experimental de milho com uma placa de controle de campo.



Fonte: Autor (2015).

O processo de aquisição das imagens ocorreu nos dias 16 e 17 de outubro de 2015, onde se realizou um voo no primeiro dia e dois no segundo.

No primeiro dia foi utilizado o Phantom 2 cedido pelo Grupo CADIC AS, com uma câmera Ricoh GRLENS de 16 megapixels e distância focal de 18,3mm. A superposição foi de 65% lateral e 85% frontal, com velocidade de 5m/s e altura de 60 metros.

No segundo dia, empregou-se um VANT Phantom 2, da DJI, da Universidade Federal do Ceará, com uma câmera GoPro Hero 4 Silver fish-eye, 12 megapixels e



distância focal de 2,8 mm. Ocorreram dois voos com alturas diferentes neste dia, sendo 60m e 30m, para posterior análise. A superposição das imagens foi de 65% lateral e 85% frontal, com velocidade de voo de 5m/s. O voo de 30 metros cobriu uma área de 100m x 100m. Para melhor entendimento, segue na Tabela 1 um resumo das missões.

Tabela 1 – Especificações dos voos realizados em Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil.

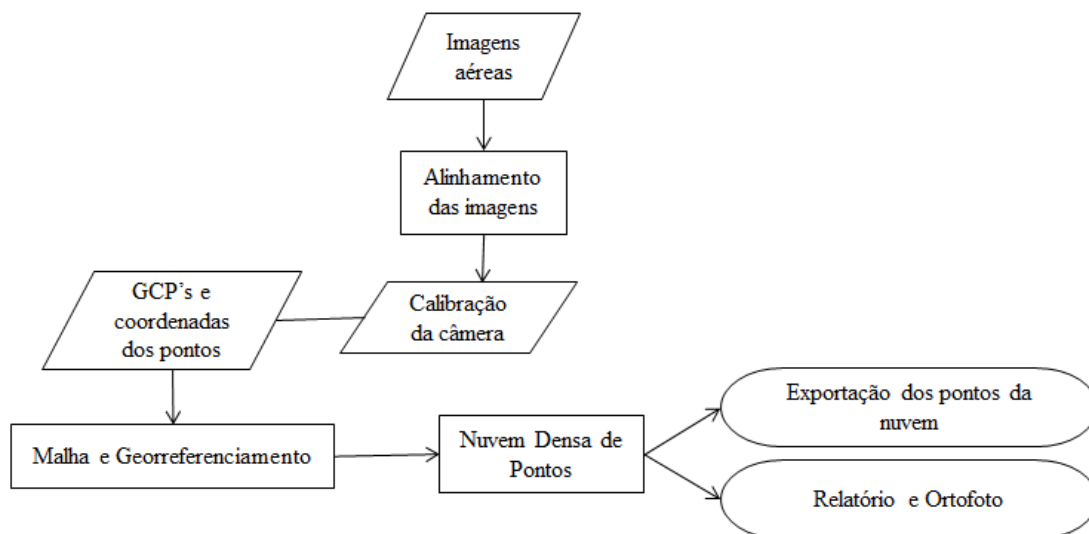
Data do voo	Equipamento	Altitude do voo	Velocidade do voo
16 de outubro de 2015	Phantom 3, Ricoh GRLENS, 16 MP.	60 metros	5 m/s
17 de outubro de 2015	Phantom 2, GoPro Hero 4 Silver, 12 MP.	60 metros	5 m/s
17 de outubro de 2015	Phantom 2, GoPro Hero 4 Silver, 12 MP.	30 metros	5 m/s

Fonte: Autor (2015).

### 3.3 Processamento dos dados

Para este trabalho empregou-se um computador com processador Intel Core™ i7-3770 de 3.40GHz, com memória RAM de 8 GB, Sistema Operacional Windows 8, 64 bits. Utilizou-se o software *PhotoScan*, da *AgiSoft*, por sua fácil interface, acesso e popularidade em trabalhos desta natureza. O processamento se divide em sete etapas, sendo 1ª) importação das imagens aéreas 2ª) Alinhamento das imagens 3ª) Calibração da câmera 4ª) Criação da malha e georreferenciamento 5ª) Geração da Nuvem Densa de Pontos 6ª) Geração da Ortofoto e exportação dos relatórios 7ª) Exportação dos pontos da nuvem (Figura 10). O software ainda permite a texturização do modelo 3D, bem como outras opções de fluxo de trabalho.

Figura 10 – Fluxograma do processamento das imagens aéreas no *PhotoScan*, da *AgiSoft*.



Fonte: Autor (2015).

Antes do processo de alinhamento das imagens, é necessário indicar o sistema de coordenadas e o *Datum*. O alinhamento das imagens é realizado com base no reconhecimento dos padrões da fotografia (Algoritmo *Structure from Motion*) e sua qualidade está diretamente relacionada com a porcentagem de superposição de imagens.

No processo de calibração da câmera, podem ser utilizados alguns softwares disponíveis no mercado. Neste trabalho foi usado o *AgiSoft Lens*. Este software calcula os coeficientes de distorção das câmeras baseado em um padrão. No caso de lentes esféricas (*fish eye*), não se fazem necessárias tais correções (AGISOFT, 2013).

Para efeito de comparação, foram calculados alguns parâmetros, sendo o *Ground Sampling Distance* (GSD, cm/pixel) o mais importante. Este dado revela o tamanho do lado do pixel e diz respeito ao nível de detalhamento da imagem. O GSD é calculado conforme a equação abaixo:

$$GSD = \frac{Hw \times H \times 100}{Fr \times Imh} \quad (5)$$

Em que:

GSD = *Ground Sampling Distance* (cm/pixel);

Hw = Height Sensor (comprimento do sensor, mm);

H = Altura de voo (m);

Fr = Focal Length (Distância focal da câmera, mm);

Imh = Image Height (Largura da imagem, pixels).

Os parâmetros da equação acima devem ser especificados no manual de cada câmera. Abaixo, na Tabela 2, são exibidos os parâmetros para as duas câmeras empregadas neste trabalho.

Tabela 2 – Especificações do tamanho do sensor das câmeras utilizadas e *Ground Sampling Distance*.

Câmera	Hw (mm)	Fr (mm)	Imh (pxl)	H (m)	GSD (cm/px)
RICOH, GRLENS 18,3.	15,5649	18,3	3264	60	1,563
GOPRO HERO 4 SILVER	4,29	2,8	2880	60	3,192
GOPRO HERO 4 SILVER	4,29	2,8	2880	30	1,596

Hw = Height Sensor (altura do sensor, mm); Fr = Focal Length (Distância focal da câmera, mm); Imh = Image Height (Altura da imagem, pixels); H = Altura de voo (m); GSD = *Ground Sampling Distance* (cm/pixel). Fonte: Manuais de instruções das respectivas câmeras e Autor (2015).

O *PhotoScan* calcula o GSD para cada processamento realizado, obtendo um valor sempre aproximado médio. Com os dados da nuvem de pontos, foi calculado o valor real dos GSD, baseado na quantidade de pixels pelo modelo gerado (nuvem densa de pontos) e na área de sobrevoo, conforme equação abaixo:

$$GSD' = \frac{\text{Área de sobrevoo}}{\text{Quantidade de pixels}} \quad (6)$$

Em que:

GSD' = *Ground Sampling Distance*, calculado manualmente (m/pixel);

Quantidade de pixels do modelo (pixels), obtido através da nuvem de pontos;

Área de sobrevoo foi obtida através do relatório de processamento.

A metodologia de cálculo da biomassa se iniciou com a seleção de uma área central de interesse, correspondente à aproximadamente 10.000 m<sup>2</sup> (um hectare), na qual foi exportada a nuvem densa de pontos pelo software *PhotoScan*. O arquivo de texto (.txt) gerado é constituído por informações dos pontos tridimensionais (*Tie points*), obtidos pelo algoritmo do software, os quais possuem coordenadas geográficas nos eixos x, y e z, de acordo com o *Datum* pré-definido, informações de cor no sistema RGB para leitura e, por fim, o posicionamento (*normals*) *Pitch*, *Roll* e *Yaw*.

Os dados da nuvem densa de pontos foram submetidos a um agrupamento em classes de altura para possibilitar a sua leitura e manipulação. Para este processo, foi empregada uma programação em C++ na qual, primeiramente, excluiu os dados referentes à cor dos pixels (RGB) e posicionamento (*Pitch*, *Roll* e *Yaw*), deixando somente informações de altura. As alturas de cada pixel foram ordenadas de forma crescente e agrupadas em classes, com duas casas decimais, diminuindo assim a quantidade de dados repetitivos. Calculou-se ainda a média de alturas e o desvio padrão das nuvens de pontos para os três processamentos, para avaliar a flutuação dos dados em torno do valor médio de altura. Adicionou-se uma coluna com informações da frequência de aparecimento de cada classe de altura para posteriormente gerar um histograma.

Este histograma relacionando as alturas dos pixels com a frequência em que eram identificadas se revelou importante para identificar as alturas mais frequentes, dedutivamente sendo a altura do stand da cultura do milho e o solo descoberto. Foi realizado um teste de probabilidade com o objetivo de identificar as classes de alturas que se localizavam entre 0,5% e 99,5%, desconsiderando as classes fora deste intervalo, sendo considerados valores discrepantes. A amplitude das classes de alturas foi calculada pela diferença entre o valor de altura em 99,5% e 0,5%. Ainda foram calculados os volumes, baseados na altura indicada na nuvem de pontos, na área do pixel e na frequência de aparecimento, conforme a equação abaixo:

$$Vol = A_{pxl} \times H_{pxl} \times Fq \quad (7)$$

Em que:

Vol = Volume de cada agrupamento de pixels (m<sup>3</sup>);

A<sub>pxl</sub> = Área do pixel (m<sup>2</sup>);

$H_{pxl}$  = Altura do pixel (m);

$F_q$  = Frequência de aparecimento do pixel em questão.

O somatório do volume de cada pixel representado no modelo correspondeu ao volume total da área em questão. A área também foi redimensionada devido à exclusão de algumas classes de alturas, o que significa na exclusão de determinada área de pixels.

Para a obtenção da massa total da área de interesse, portanto, o volume calculado com os dados da nuvem densa de pontos foi multiplicado pela informação da densidade obtida em campo. A biomassa, por conseguinte, foi obtida dividindo a massa pela área efetiva (já contabilizada a exclusão de alguns pixels fora do intervalo citado no teste de probabilidade), sendo aproximadamente de 10.000 m<sup>2</sup> (um hectare). A comparação entre a biomassa obtida em cada processamento foi calculada segundo a equação 8.

$$Rb = \frac{Bc}{Bfm} \times 100 \quad (8)$$

Em que:

$Rb$  – Relação entre biomassas (%)

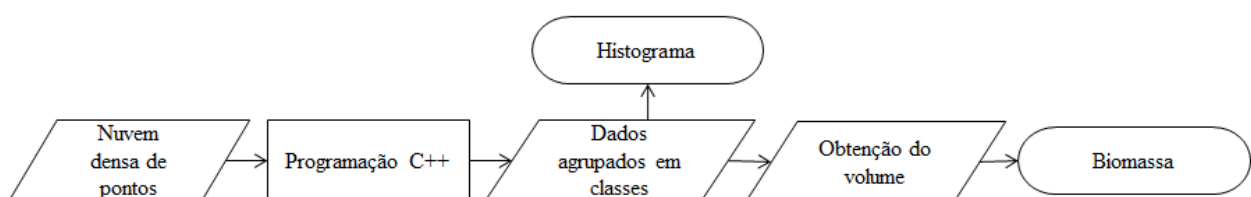
$Bc$  – Biomassa calculada através da nuvem de pontos (kg m<sup>-2</sup>);

$Bfm$  – Biomassa fresca média obtida em campo (kg m<sup>-2</sup>).

A Equação 8 revela o quanto que a biomassa calculada pela nuvem de pontos ( $Bc$ ) representa na biomassa obtida em campo ( $Bfm$ ). Deste modo, quanto mais perto de 100% a relação entre biomassa ( $Rb$ ) estiver, mais preciso será o método.

Abaixo, na Figura 11, é apresentado todo o fluxograma do processamento para melhor compreensão.

Figura 11 – Fluxograma da manipulação da nuvem densa de pontos para o cálculo da biomassa.



Fonte: Autor (2015).

As informações de biomassa e volume resultantes processamento computacional foram comparadas entre si e confrontadas com os valores obtidos pelo método de amostragem em campo. A comparação entre métodos supracitados se deu de acordo com os tratamentos abaixo indicados:

- Câmera Ricoh GRLENS 18,3; processamento no software *PhotoScan*, aos 60 metros de altura (Processamento 1);
- Câmera GoPro Hero 4 Silver; processamento no software *PhotoScan*, aos 60 metros de altura (Processamento 2);
- Câmera GoPro Hero 4 Silver; processamento no software *PhotoScan*, aos 30 metros de altura (Processamento 3).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados os resultados descritos no objetivo deste trabalho, bem como as discussões com base em trabalhos existentes na literatura.

### 4.1. Dados da amostragem convencional em campo

Na Tabela 3 são demonstrados os valores médios de massa fresca, altura, volume, densidade de silo, biomassa fresca, volume por hectare e massa por hectare, obtidos através da amostragem em campo.

Tabela 3 – Valores obtidos da amostragem em campo do milho AG 1051, Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil.

	Mf (kg)	Ms (kg)	H (m)	Vs (m <sup>3</sup> )	Dd (kg m <sup>-3</sup> )	Bf (kg m <sup>-2</sup> )	Bs (Kg m <sup>-2</sup> )	Vol (m <sup>3</sup> ha <sup>-1</sup> )	Massa (t/ha)
1º Dia	3,10	0,65	2,205	0,016	1,410	3,10	0,65	160,0	30,97
2º Dia	2,76	0,58	2,238	0,015	1,239	2,76	0,58	147,5	27,61
Média	2,93	0,61	2,22	0,02	1,32	2,93	0,61	153,75	29,29

Mf – Massa Fresca do milho (kg); Ms – Massa Seca do milho (kg); H – Altura média das plantas dentro da amostragem de 1m<sup>2</sup>; Vs – Volume do milho picado (m<sup>3</sup>); Df – Densidade de Dossel (kg m<sup>-3</sup>); Bf – Biomassa Fresca (kg m<sup>-2</sup>); Bs – Biomassa Seca (kg m<sup>-2</sup>); Vol – Volume de milho por hectare (m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup>); Massa – Massa por hectare (t/ha). Fonte: Autor (2015).

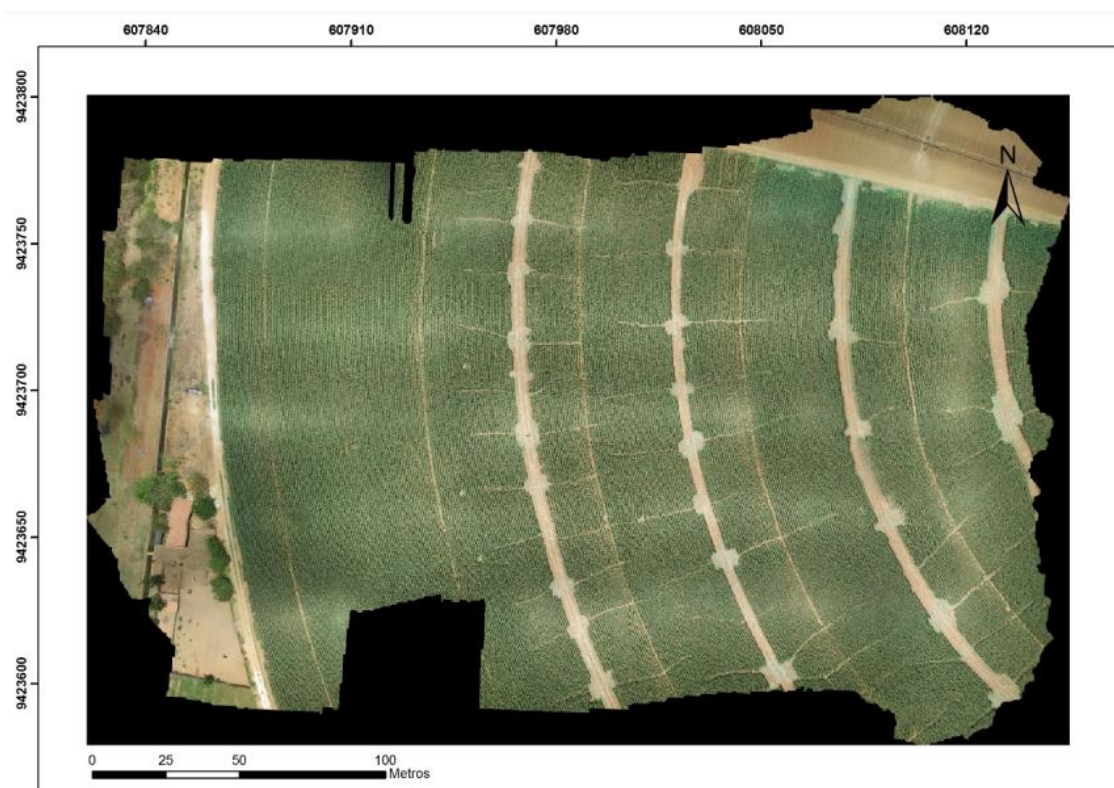
A produção de massa fresca é um importante indicador de produtividade das culturas, além de ser informação necessária para o dimensionamento de silos. Os valores acima se apresentam coerentes quando comparados com Santos *et al.* (2010), que obtiveram valores médios de massa fresca de 33,8 toneladas, testando seis variedades de milho para silagem em Pernambuco. Guareschi *et al.* (2010), em Goiás, testaram três híbridos de milho comercialmente destinados à produção de espigas e silagem, e encontraram valores médios de 32,05 toneladas por hectare de massa fresca.

Após o procedimento de secagem das amostras, observou-se que 79% do peso do material, em média, é composto por água. Tal resultado é semelhante aos valores obtidos por Oliveira *et al.* (2011), que constataram umidades aproximadas de 73% em híbridos de milho no Estado do Paraná.

### 4.2. Ortofotos e georreferenciamento

Nas Figuras 12 e 13 são apresentadas as ortofotos geradas pelo processamento com o sistema de aquisição composto pela câmera Ricoh GRLENS e o VANT Phantom 3, e GoPro Hero 4 Silver e o Phantom 2, respectivamente, a 60 metros de altura. O correto georreferenciamento foi validado utilizando um software SIG (Sistema de informações geográficas), ArcGis, ESRI™, em que, ao carregar as ortofotos, averiguou-se que os pontos coletados com o GPS estavam devidamente posicionados sobre as placas de controle em campo (GCP's).

Figura 12 – Ortofoto georreferenciada proveniente do Processamento 1 (Phantom 2 + Ricoh GRLENS), área de cultivo de milho, Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil, 2015.

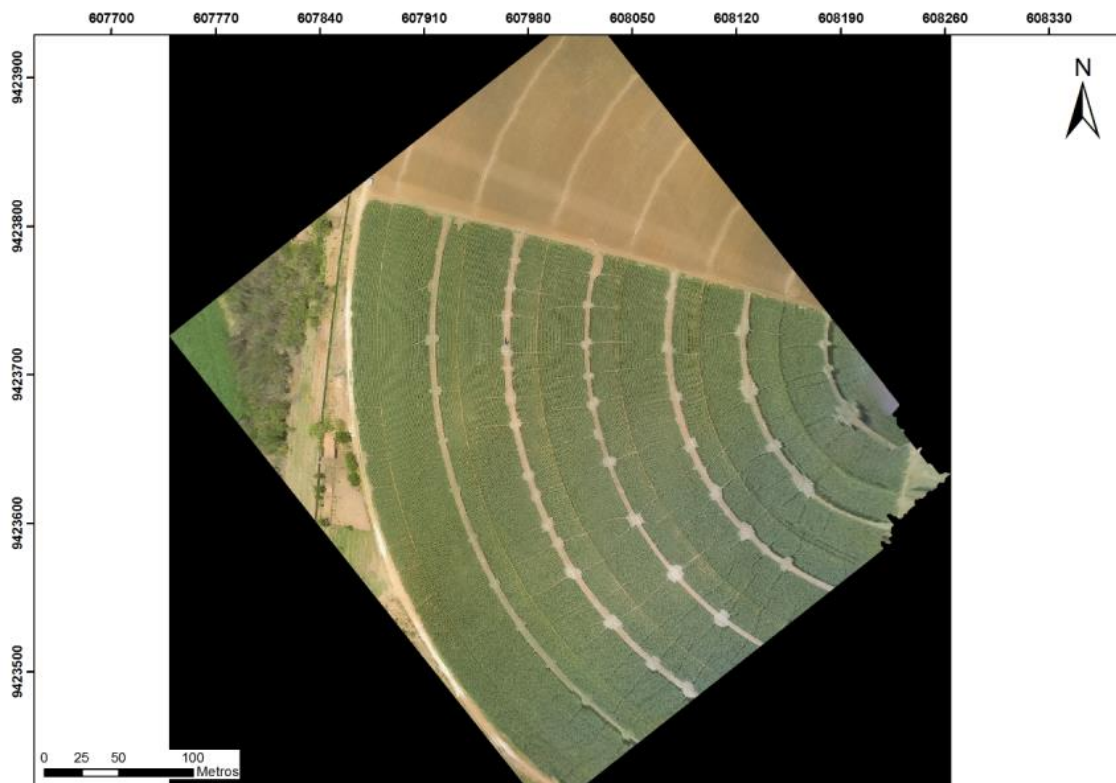


Fonte: Autor (2015).

Na Figura 12 acima são observadas algumas linhas de entrada de máquinas para facilitar a colheita do milho verde, realizada de forma manual. São observadas também as linhas feitas pelos rodados do pivô central.



Figura 13 – Ortofoto georreferenciada proveniente do Processamento 2 (Phantom 2 + GoPro Hero 4 Silver), área de cultivo de milho, Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil, 2015.



Fonte: Autor (2015).

As lacunas perceptíveis na Figura 12 foram devido à falta de superposição de imagens, ou superposição insuficiente. O campo de visão da Ricoh GRENSE é menor, em comparação ao da GoPro, fato explicado pelo tipo de lente proveniente de cada câmera, sendo plana na Ricoh GRENSE e esférica (*Fish eye*) na GoPro. No caso da ortofoto gerada pela GoPro juntamente com o VANT Phantom 2, percebe-se a grande área coberta pelo sensor da câmera, apesar das alturas de voo serem a mesma. A resolução das imagens obtidas com a Ricoh GRENSE são de qualidade superior comparadas a GoPro, fato observável nas Figuras 12 e 13. Isto decorre da quantidade de pixels gerados pelo sensor de cada câmera (Ricoh GRENSE = 16 MP e GoPro = 12 MP)

Para melhor organização das tabelas subsequentes (Tabelas 4 a 9), foram especificados os sistemas de aquisição como sendo:

**Processamento 1** – Phantom 3; Câmera Ricoh GRENSE 18,3; sobrevoos a 60 metros de altura;

**Processamento 2** – Phantom 2; Câmera GoPro Hero 4 Silver; sobrevoos a 60 metros de altura;

**Processamento 3** – Phantom 2; Câmera GoPro Hero 4 Silver; sobrevoos a 30 metros de altura.

Neitzel e Klonowski (2011) realizaram uma comparação entre nuvens densas de pontos de diversos softwares disponíveis no mercado (Photosynth, Blunder, PMVS2, *PhotoScan*, ARC3D), encontrando uma construção de aproximadamente 110 pontos por metro quadrado no modelo gerado pelo *PhotoScan*. Percebe-se que a construção da nuvem densa do trabalho supracitado foi menos espaçada que dois processamentos realizados nesta monografia, provavelmente devendo-se ao fato de uma menor superposição de imagens (70% frontal e 60 % lateral), conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Erros do georreferenciamento e pontos por metro quadrado das nuvens de pontos provenientes dos processamentos.

Processamento	Erro mínimo (m)	Erro máximo (m)	Erro médio (m)	Pontos por m <sup>2</sup>
1	0,02	0,31	0,15	440,06
2	0,04	0,56	0,31	60,81
3	0,14	0,65	0,34	281,89

Fonte: Autor (2015).

Bachmann *et al.* (2013) utilizaram o *PhotoScan* para a construção de ortofotos em uma área agrícola, detalhando as técnicas utilizadas para a geração do modelo. Testaram o sistema de aquisição de dados geográficos provenientes do próprio VANT (Oktokopter, HiSystems GmbH) e de um sistema de precisão milimétrica RTK-GNSS. Foi observado que no sistema de aquisição proveniente do VANT os erros na ortofoto alcançaram 1,6 metros, enquanto que no sistema de aquisição RTK-GNSS, foi constatado um erro mínimo de 0,3 m e máximo de 1,3 m. Tais valores se aproximam dos erros obtidos neste trabalho, conforme Tabela 4.

Na Figura 14 são ilustrados os segmentos de 1 hectare (10.000 m<sup>2</sup>) destacados dos voos completos realizados. É notória uma diferença na cor dos pixels relacionada com a qualidade da imagem da câmera Ricoh GRENSE em comparação a GoPro. Também nota-se a diferença entre as figuras B e C no que diz respeito ao nível de detalhamento, uma vez que voos com altitudes mais baixas possuem mais detalhes visíveis.

Figura 14 – Ortofotos georreferenciadas provenientes das 3 secções de aproximadamente 1 ha, área de cultivo de milho, Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil, 2015. Sendo A) Processamento 1; B) Processamento 2; C) Processamento 3.



Fonte: Autor (2015).

Para efeito de comparação, a figura 15 ilustra o nível de detalhamento entre o voo a 60 metros de altura e a 30 metros de altura, ambos realizados com a câmera GoPro Hero 4 Silver.

Figura 15 – Comparação entre o Nível de detalhamento de duas imagens com a mesma câmera em duas alturas diferentes, sendo A) Processamento 2, 60 metros de altura; B) Processamento 3, 30 metros de altura.



Fonte: Autor (2015).

### 4.3. Nuvem densa de pontos e Modelo Digital de Elevação

A comparação entre a quantidade de pontos 3D reconhecidos como padrões para o algoritmo (*Tie points*) revela o nível de detalhamento dos produtos, além da

quantidade de pontos gerados na nuvem densa, de acordo com a Tabela 5. O Processamento 2, realizado com imagens oriundas da câmera GoPro a 60 metros de altura, se mostrou, dentre os tratamentos, o que apresenta menor quantidade de pontos 3D, culminando em um arquivo pequeno como produto. A avaliação do método, no entanto, não encontrou problemas na fidedignidade dos resultados, tampouco imprecisão nas alturas obtidas.

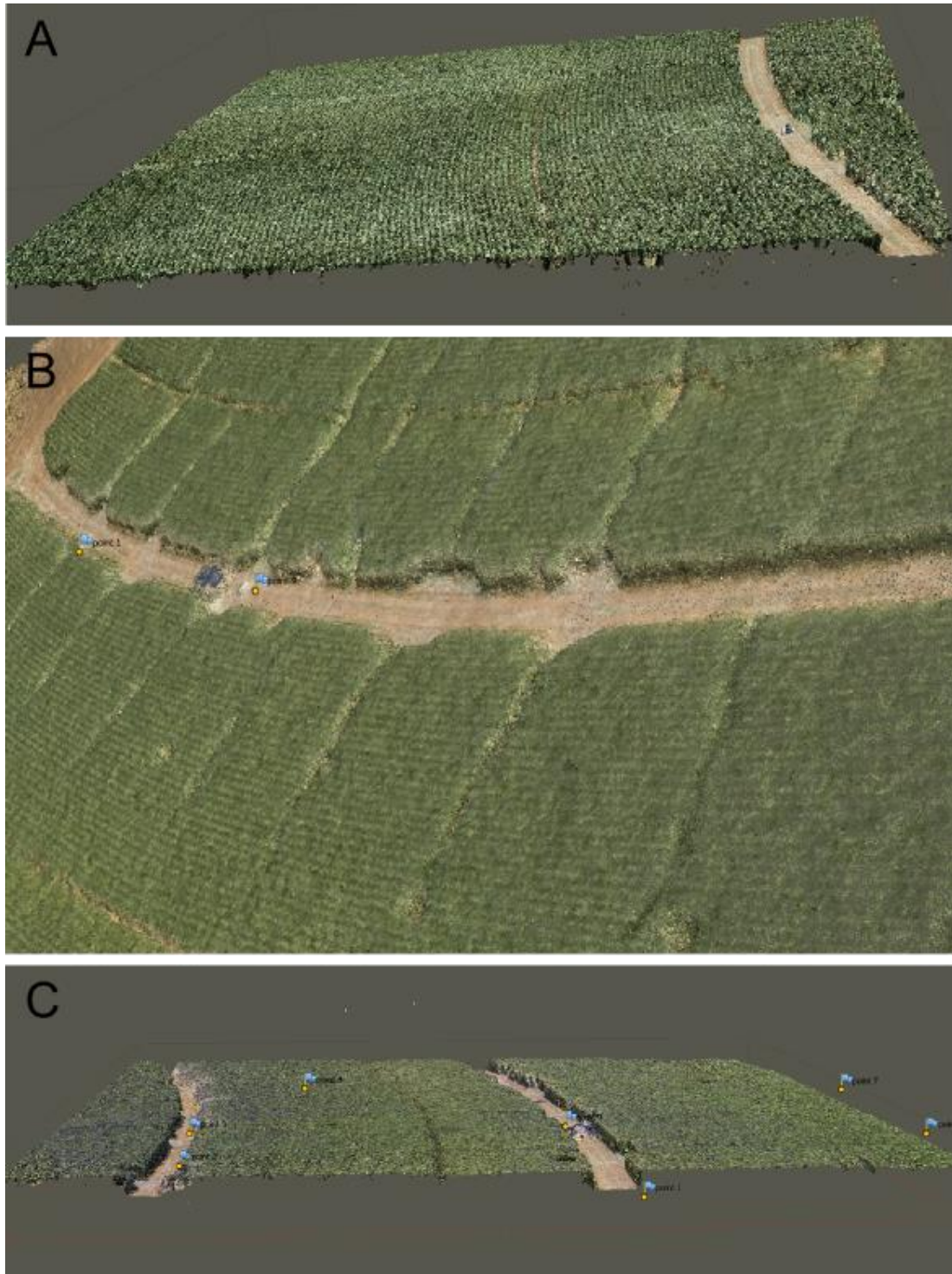
Tabela 5 – Detalhamento das características das nuvens densas de pontos e arquivos pós manipulação em C++.

Dados	<i>Tie Points</i>	Qtde. de pontos na nuvem densa	Tamanho do arquivo gerado (MB)	Tamanho do arquivo agrupado (kB)
Processamento 1	19.553	7.378.621	497	22
Processamento 2	3.575	3.484.787	72	10,4
Processamento 3	24.358	4.729.222	370	9

Fonte: Autor (2015).

Na Figura 16 são demonstradas as nuvens densas de pontos geradas a partir dos respectivos processamentos. Rosnell e Honkavaara (2012) relatam que a qualidade e a precisão da nuvem de pontos em um modelo digital é função da percentagem de superposição das imagens e do desempenho do método de alinhamento. As nuvens geradas podem ainda ser caracterizadas por dois indicadores de qualidade: a integralidade da nuvem e a precisão dos pontos individuais. Diversos fatores estão relacionados à qualidade da nuvem, como iluminação e velocidade do vento no momento da aquisição das imagens aéreas, qualidade do sensor, parâmetros da atmosfera, semelhança de pixels nas imagens (ausência de padrões geométricos). Os autores ainda afirmam que a precisão dos pontos individuais é decorrente da qualidade do posicionamento geográfico dos pontos utilizados no georreferenciamento e qualidade do equipamento GNSS, bem como na quantidade de pontos de controle em campo utilizados.

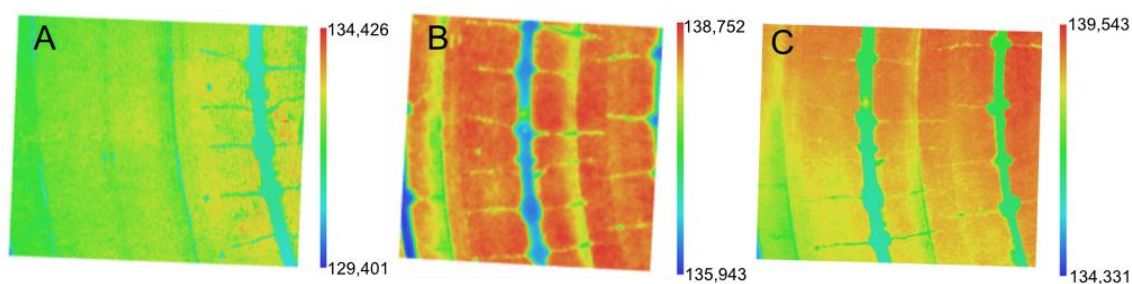
Figura 16 – Nuvem densa de pontos (secção de 1 ha) gerada pelo processamento no software *PhotoScan*. Sendo A) Processamento 1 – Phantom 3; Câmera Ricoh GRLENS 18,3; sobrevoos a 60 metros de altura; B) Processamento 2 – Phantom 2; Câmera GoPro Hero 4 Silver; sobrevoos a 60 metros de altura; C) Processamento 3 – Phantom 2; Câmera GoPro Hero 4 Silver; sobrevoos a 30 metros de altura.



Fonte: Autor (2015).

Zarco-Tejada *et al.*, (2014) buscaram avaliar a qualidade de reconhecimento de alturas de plantas (Oliveiras) utilizando uma câmera de baixo custo. Os autores encontraram uma alta correlação ( $R^2 = 0,83$ ) entre os dados provenientes da nuvem de pontos e as medições de altura em campo, além de um erro estimado de 0,35 cm, demonstrando as grandes possibilidades de precisão do método de reconstrução de modelos digitais de elevação utilizando VANTs. Abaixo, na Figura 17, são ilustrados os modelos digitais de elevação da área de estudo. Vale ressaltar que as alturas máximas e mínimas das figuras abaixo são dados referentes ao georreferenciamento com os equipamentos GNSS, sendo, portanto, diferentes para o processamento 1, uma vez que a altura (cota do solo) considerada pelo R4 Trimble é diferente da altura considerada pelo ProMark 3.

Figura 17 – Modelos digitais de elevação gerados pelo software *PhotoScan*. Sendo A) Processamento 1; B) Processamento 2; C) Processamento 3.



Fonte: Autor (2015).

Abaixo, na Tabela 6, são demonstrados os valores das alturas das plantas medidas em campo, totalizando em oito amostras dentro de uma área de 1 hectare. Na Tabela 7 são observados os erros de altitude provenientes do processamento dos dados.

Tabela 6 – Altura das plantas nas amostragens realizadas em campo.

Amostra	Altura da planta
1	2,2
2	2,02
3	2,3
4	2,3
5	2,26
6	2,2
7	2,34
8	2,15
Média	2,22125

Fonte: Autor (2015).

Tabela 7 – Erros de altura provenientes dos dados das nuvens densa de pontos e desvio padrão.

Processamento	Amplitude de altura (m)	Erro de altura (m)	Altitude média (m)	Desvio Padrão (m)
1	2,659	0,03	132,08	0,77
2	2,598	0,25	137,36	0,75
3	3,189	0,26	137,67	0,94

Fonte: Autor (2015).

As amplitudes das alturas foram calculadas excluindo os valores extremos considerados no modelo da nuvem de pontos. A altura média do stand da cultura do milho obtida foi de 2,22 metros, indicando uma grande aproximação dos valores gerados pela nuvem, corroborando com os valores encontrados por Zarco-Tejada *et al.*, (2014). O erro de altura foi encontrado comparando os valores de altura do GNSS com os valores de altura da nuvem, sendo considerado aceitável. O Processamento 1, realizado com imagens da câmera Ricoh GRLENS, apresentou um valor de erro baixo, comparável a Siebert e Teizer (2014) que realizaram testes para estimar a precisão da altura, obtendo 0,025 metros utilizando o *PhotoScan*.

O valor do desvio padrão encontrado no Processamento 2 indica que, dentre os processamentos, este foi o que obteve menores variações de altura em torno da média, assegurando maior fidelidade dos dados. Apesar da boa superposição de imagens alcançadas com a câmera GoPro, o Processamento 3 contou apenas com 8 pontos de controle em campo para o georreferenciamento (área sobrevoada de 1,1 ha), em contrapartida aos demais Processamentos (9 pontos de controle), podendo ser o motivo da maior dispersão de pontos em torno da média. No caso do Processamento 1, apesar do erro médio de alturas ter sido menor e seu georreferenciamento contar com 9 pontos de controle em campo, seu desvio padrão foi intermediário. Este fato pode ser explicado pela baixa superposição de imagens, comparado com a visada do sensor esférico da GoPro.

#### 4.4. Teste de probabilidade e distribuição de alturas

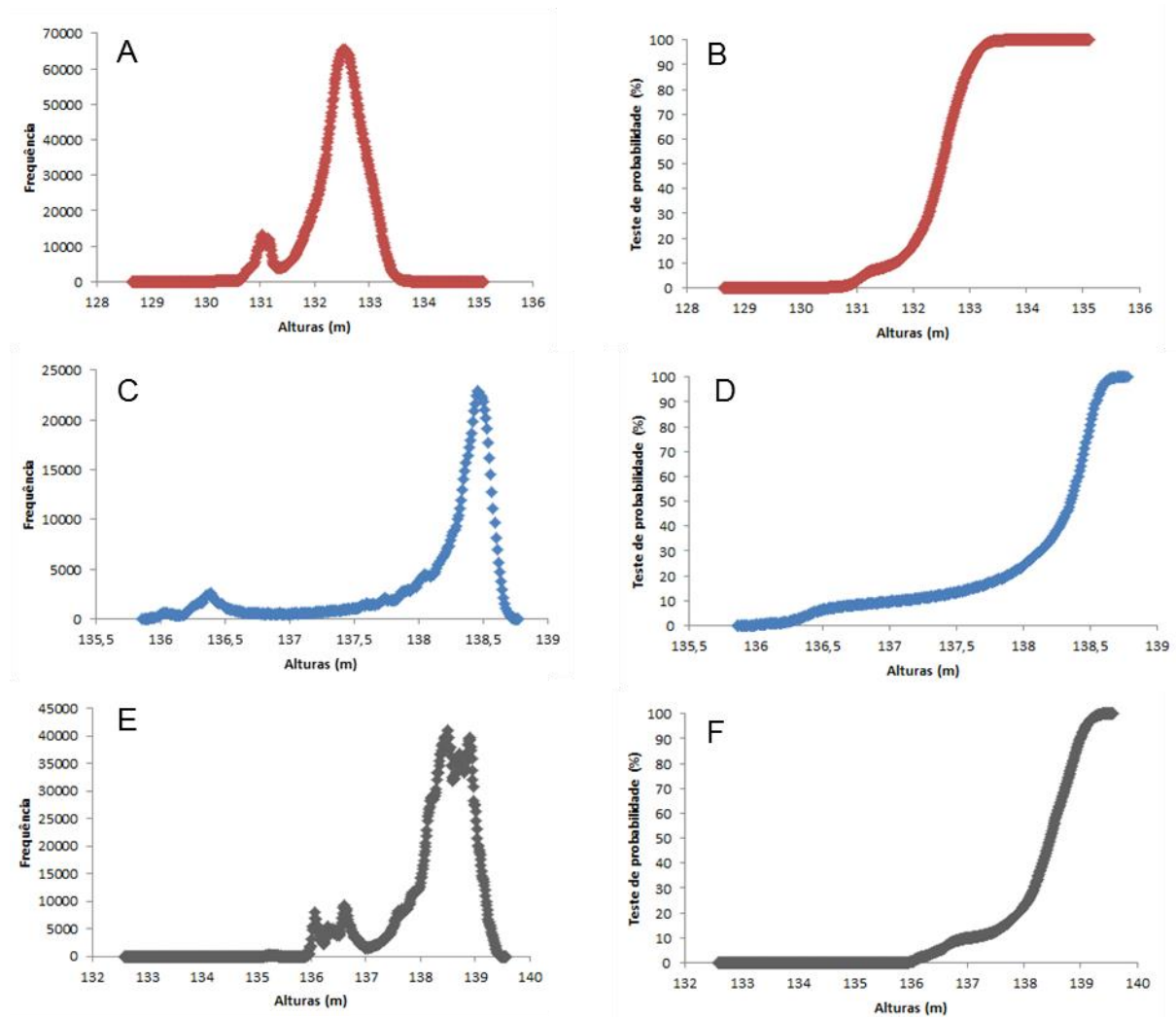
Os gráficos abaixo (Figura 18) foram realizados com base nos respectivos testes de probabilidade das altitudes (B, D e F) e nas frequências em que as alturas foram

identificadas (A, C e E). Os gráficos do teste de probabilidade foram importantes para a compreensão da construção da nuvem de pontos, bem como a fidedignidade dos resultados. Os dados de altura correspondentes a valores menores que 0,5% e 99,5% da probabilidade foram excluídos da análise, reduzindo a variância dos valores em torno da média, por excluir valores discrepantes. A análise dos dados do teste de probabilidade mostrou-se coerente quando comparado com os valores de alturas das plantas obtidas em campo.

Após o agrupamento dos dados feito em C++, as alturas repetidas ou muito próximas foram agrupadas em classes, para facilitar a compreensão e leitura dos dados. Os gráficos de Alturas x Frequência indicam a quantidade de vezes que determinada altura foi identificada em uma classe. Inferem-se destes gráficos valores de picos maiores e menores, dedutivamente sendo os valores de alturas que mais se repetem na nuvem de pontos, interpretados como sendo o solo descoberto e a altura das plantas. Devido à uniformidade do plantio comercial, os dados abaixo obtidos nos Processamentos 2 e 3 descrevem com confiabilidade os valores reais de campo, pois quando comparados os valores de picos aos valores obtidos em campo, as alturas realmente se davam com grande proximidade.



Figura 18 – Distribuição e probabilidade de altitudes. A e B) Processamento 1; C e D) Processamento 2; E e F) Processamento 3.



Fonte: Autor (2015).

De forma geral, os gráficos apresentam-se de maneira semelhantes, sendo possível identificar um padrão de reconhecimento. Os picos observados no Gráfico A estão mais próximos entre si, revelando a pequena amplitude entre os valores, enquanto o padrão do Gráfico E apresentou-se diferenciado, com quatro picos bem definidos. A razão deste comportamento pode estar relacionada à qualidade do georreferenciamento (realizado apenas com oito pontos de controle em campo), que possui influência direta na qualidade da nuvem de pontos, em contraste com os demais gráficos.

Tabela 8 – Alturas do teste de probabilidade e identificação dos valores mais frequentes no histograma de alturas.

Processamento	H <sub>0,5%</sub> (m)	H <sub>99,5%</sub> (m)	Pico maior (m)	Pico menor (m)	ΔH (m)	Erro (m)
1	130,754	133,413	132,533	131,034	1,499	0,701
2	136,062	138,660	138,461	136,392	2,069	0,131
3	136,034	139,223	138,503	136,604	1,899	0,301

H<sub>0,5%</sub> - Classe de altura em 0,5%; H<sub>99,5%</sub> - Classe de altura em 99,5% do teste de probabilidade; ΔH - Diferença de altura entre o maior e o menor pico de classes de altitude. Fonte: Autor (2015).

Os valores de erro acima foram obtidos pela subtração entre a altura das plantas de milho e a altura média obtida com o processamento dos pontos. Os valores da diferença de altura (ΔH) encontrados na Tabela 8 podem ser comparados à altura média do milho estimada em campo, sendo o Processamento 2 aquele que mais se aproximou de 2,22 metros.

#### 4.5. Comparação entre biomassas

Todos os procedimentos aqui realizados confluíram para a averiguação da possibilidade de criação de uma metodologia capaz de estimar a biomassa através do uso de VANTs. Desta forma, os resultados dos volumes e biomassa obtidos são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Resultados obtidos referentes aos dados da nuvem de pontos para o cálculo da biomassa fresca.

Processamento	Volume estimado (m <sup>3</sup> )	Área de voo (m <sup>2</sup> )	GSD (m/pixel)	Massa estimada (t)	Biomassa estimada (kg m <sup>-2</sup> )
1	17800,85	10775,90	0,04055	23,58	2,21
2	20351,78	10017,40	0,10303	26,96	2,72
3	23988,85	10910,20	0,04793	31,77	2,97

GSD – *Ground Sampling Distance*. Fonte: Autor (2015).

Os valores da massa estimada pelo modelo aqui proposto demonstram grande veracidade quando comparados com os valores de massa (aproximadamente 31 toneladas) obtidos em trabalhos de cunho fitotécnico apresentados por Santos *et al.*, 2010; Guareschi *et al.*, (2010). As biomassas obtidas foram comparadas à média da amostragem em campo, demonstrando serem valores com grande aproximação do valor estimado real, conforme a Tabela 10.

Tabela 10 – Comparação entre os valores de biomassa estimados pelo modelo e a relação com a biomassa real obtida em campo.

Processamento	Biomassa estimada (Bc) (kg m <sup>-2</sup> )	Relação entre biomassas (Rb) (%)
1	2,21	75,45
2	2,72	92,86
3	2,97	101,40

Fonte: Autor (2015).

A relação entre Biomassas (Rb) é uma representação em porcentagem do valor de biomassa estimado pelo processamento dos dados de maneira computacional e o valor de biomassa calculado pela maneira convencional em campo. Quanto mais próximo o valor de Rb a 100%, mais preciso foi o cálculo pela a nova metodologia aqui proposta.

O valor da biomassa encontrado no processamento 3 praticamente se igualou ao valor obtido em campo, demonstrando a boa precisão do método desenvolvido, ao passo que no Processamento 1, o valor encontrado representou apenas 74,45% do valor da amostragem em campo. Tal evento provavelmente deve-se ao fato da baixa qualidade de superposição das imagens em relação às superposições obtidas com a lente esférica dos Processamentos 1 e 2.

A superposição das imagens obtidas com a câmera GoPro devido à lente esférica foi mais eficiente, gerando nuvens de pontos mais consistentes. As distorções que são ocasionadas pelas características das lentes são satisfatoriamente corrigidos pelo software *PhotoScan*. Quanto mais próximo a 100%, maior é a proximidade do valor de biomassa calculado pela nuvem de pontos do valor real estimado obtido em campo (2,93 kg m<sup>-2</sup>). Os Processamentos 1 e 2, portanto, alcançaram resultados bem próximos a 100%, indicando alta precisão na estimativa da biomassa.

## 5. CONCLUSÕES

A metodologia desenvolvida demonstrou-se precisa na estimativa da biomassa da cultura do milho, principalmente no Processamento 3, composto pelo Phantom 2 conjugado à uma câmera GoPro Hero 4 Silver e altitude de voo de 30 metros. O amplo campo de visão do sensor da câmera gerou uma alta superposição de imagens, contribuindo para o reconhecimento dos padrões nas imagens pelo algoritmo (*Structure from motion*) do *PhotoScan*, da *AgiSoft*, constituindo uma nuvem densa de pontos de excelente precisão e qualidade.

A plataforma composta pelo veículo aéreo não tripulado quadricóptero, Phantom 2, mostrou-se eficiente na aquisição das imagens, sendo recomendável para serviços desta natureza. A programação do voo pelo software *Ground Station* mostrou-se excelente, no que diz respeito a segurança de voo, facilidade de programação e definição da rota.

O software *PhotoScan* mostrou-se eficiente na geração dos produtos esperados. O tempo de processamento e os custos com a aquisição do software podem ser considerados desvantagens do método. A qualidade da máquina utilizada é fator determinante para o tempo de processamento e a popularização dos softwares e a criação de novas empresas do ramo podem gerar uma maior concorrência e culminar em uma popularização do preço dos softwares.

## 6. RECOMENDAÇÕES

A nova metodologia pode ser recomendada para a estimativa da biomassa e volume de plantios comerciais de milho, mostrando-se precisa em voo a 30 metros de altura com câmera GoPro Hero 4 Silver, associado a um Phantom 2. A aplicação para outras culturas, como sorgo, cana de açúcar, milho, feijão ou soja, é promissora, podendo ser ferramenta importante na previsão de safras e estimativa de produtividade. Todas as etapas do trabalho podem ser adequadas ao leque de serviços de empresas de geotecnologias que atuam também no setor agrícola.

O *PhotoScan* da *AgiSoft* mostrou-se uma ferramenta poderosa na geração dos produtos esperados, aliando as técnicas mais modernas de processamento à precisão dos dados, sendo recomendável para serviços desta natureza. Outros softwares são passíveis de avaliação, contribuindo assim para uma maior abertura da concorrência no mercado, culminando em maiores inovações tecnológicas e popularização dos preços.

Para o processamento dos dados se faz necessário um computador com um bom desempenho, sendo fator crucial no tempo de processamento. Neste trabalho o tempo médio de processamento foi de 15 horas. O processamento dos dados utiliza 100% da capacidade de processamento do computador utilizado, significando que, para uma empresa que atue no setor, haverá um computador indisponível por todo o tempo de processamento.

## REFERÊNCIAS

- AGISOFT LLC, 2013. *AgiSoft PhotoScan User Manual*. Professional Edition, Version 1.0.0. Disponível em: <[http://www.AgiSoft.ru/pscan/help/en/pscan\\_pro.pdf](http://www.AgiSoft.ru/pscan/help/en/pscan_pro.pdf)>. Acesso em: 20 dez. 2015.
- ANTUNES, A. F. B.; HOLLATZ, R. C. V. Cadastro Técnico Multifinalitário de baixo custo utilizando VANT (veículo aéreo não tripulado). **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 17, p. 5858-5864, 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1205.pdf> >. Acesso em 17 dez. 2015.
- AMICI, S. et al. Volcanic Environments Monitoring by Drones Mud Volcano Case Study. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Germany, v. 1, p. W2, 2013. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Stefania\\_Amici/publication/256615062\\_VOLCANIC\\_ENVIRONMENTS\\_MONITORING\\_BY\\_DRONES\\_MUD\\_VOLCANO\\_CASE\\_STUDY/links/00b4952cbcc47a9fc3000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Stefania_Amici/publication/256615062_VOLCANIC_ENVIRONMENTS_MONITORING_BY_DRONES_MUD_VOLCANO_CASE_STUDY/links/00b4952cbcc47a9fc3000000.pdf)>. Acesso em: 12 dez. 2015.
- BACHMANN, F. et al. Micro UAV based georeferenced orthophoto generation in VIS+ NIR for precision agriculture. **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci**, p. 11-16, 2013. Disponível em: <<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XL-1-W2/11/2013/isprsarchives-XL-1-W2-11-2013.pdf>>. Acesso em: 27 dez. 2015.
- BALUJA, J. et al. Assessment of vineyard water status variability by thermal and multispectral imagery using an unmanned aerial vehicle (UAV). **Irrigation Science**, v. 30, n. 6, p. 511-522, 2012. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s00271-012-0382-9>>. Acesso em: 15 dez. 2015.
- BELLVERT, J. et al. Mapping crop water stress index in a ‘Pinot-noir’ vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. **Precision agriculture**, v. 15, n. 4, p. 361-376, 2014. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s11119-013-9334-5#>>. Acesso em: 15 dez. 2015.
- BENDIG, J. et al. Estimating biomass of barley using crop surface models (CSMs) derived from UAV-based RGB imaging. **Remote Sensing**, v. 6, n. 11, p. 10395-10412, 2014. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/6/11/10395/htm>>. Acesso em 16 dez. 2015.
- BRANCO, L. H. C.; SEGANTINE, P. C. L. Veículos Aéreos Não Tripulados como Sensores Remotos Auxiliando na Detecção de Defeitos em Pavimentos. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 17, p. 5834-5841, 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1198.pdf>>. Acesso em 17 dez. 2015.
- BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. **Sistemas de aeronaves pilotadas remotamente e o acesso ao espaço aéreo brasileiro**. 2015.

BRITO, J. L. S. et al. Utilização de imagens aéreas de um Veículo Aéreo Não-Tripulado (VANT) para estimativa de cobertura verde das pastagens cultivadas em duas áreas experimentais no município de Uberlândia-MG. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 17, p. 1360-1367, 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0251.pdf>>. Acesso em 17 dez. 2015.

CALDERÓN, R. et al. High-resolution airborne hyperspectral and thermal imagery for early detection of Verticillium wilt of olive using fluorescence, temperature and narrow-band spectral indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 139, p. 231-245, 2013. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425713002435>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

CASBEER, D. W. et al. Forest fire monitoring with multiple small UAVs. In: **American Control Conference, 2005. Proceedings of the 2005**. IEEE, USA, jun 2005. p. 3530-3535. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=1470520&tag=1](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=1470520&tag=1)>. Acesso em 12 dez. 2015.

CASSEMIRO, G. H. M.; PINTO, H. B. **Composição e processamento de imagens aéreas de alta-resolução obtidas com Drone**. Brasília: 2014. Disponível em: <[https://fga.unb.br/articles/0000/7686/TCC2\\_GuilhermeCassemiro\\_090115465\\_e\\_HugoBorges\\_090116461\\_v2.pdf](https://fga.unb.br/articles/0000/7686/TCC2_GuilhermeCassemiro_090115465_e_HugoBorges_090116461_v2.pdf)>. Acesso em: 18 dez. 2015.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. CONAB Acompanhamento da safra 2014/2015, 2015. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conteudos.php?a=1253&>>. Acesso em: 18 dez. 2015.

ÇABUK, A.; DEVECI, A.; ERGINCAN, F. Improving heritage documentation. **GIM International**, v. 21, n. 9, 2007.

DANDOIS, J. P.; OLANO, M.; ELLIS, E. C. Optimal Altitude, Overlap, and Weather Conditions for Computer Vision UAV Estimates of Forest Structure. **Remote Sensing**, v. 7, n. 10, p. 13895-13920, 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/7/10/13895/htm>>. Acesso em: 18 dez. 2015.

DEMURA, T.; YE, Z.. Regulation of plant biomass production. **Current opinion in plant biology**, v. 13, n. 3, p. 298-303, 2010. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369526610000208>>. Acesso em: 18 dez. 2015.

D'OLEIRE-OLTMANN, S. et al. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. **Remote Sensing**, v. 4, n. 11, p. 3390-3416, 2012. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/4/11/3390/htm>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

DOHERTY, P. Advanced Research with Autonomous Unmanned Aerial Vehicles. In: **KR**. Sweden, 2004. p. 731-732. Disponível em: <<http://www.aaai.org/Papers/KR/2004/KR04-076.pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2015.

DOMINGUES, A. N. et al. Agronomic characteristics of corn hybrids for silage production in the State of Mato Grosso, Brazil. **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 35, n. 1, p. 7-12, 2013. Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1807-86722013000100002&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1807-86722013000100002&script=sci_arttext)>. Acesso em: 18 dez. 2015.

DUBAYAH, R. O. et al. Estimation of tropical forest height and biomass dynamics using lidar remote sensing at La Selva, Costa Rica. **Journal of Geophysical Research: Biogeosciences** (2005–2012), v. 115, n. G2, 2010. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009JG000933/pdf>>. Acesso em: 18 dez. 2015.

EISENBEISS, H.; ZHANG, L. Comparison of DSMs generated from mini UAV imagery and terrestrial laser scanner in a cultural heritage application. **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVI-5**, Switzerland, 90e96, 2006. Disponível em: <[http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/part5/paper/EISE\\_649.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/part5/paper/EISE_649.pdf)>. Acesso em: 11 dez. 2015.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **EMBRAPA Agência de informação**. 2015. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agua-na-agricultura/observatorio-safra-2014-2015>>. Acesso em: 18 dez. 2015.

FAN, J. et al. Modeling the EXIF-Image correlation for image manipulation detection. In: Image Processing (ICIP), **18th IEEE International Conference on**. IEEE, 2011. p. 1945-1948. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=6115853&tag=1](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=6115853&tag=1)>. Acesso em: 18 dez. 2015.

FAHLSTROM, P.; GLEASON, T. **Introduction to UAV systems**. John Wiley & Sons, 2012. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=uLsNtm99IWYC&oi=fnd&pg=PT9&dq=Introduction+to+UAV+Systems&ots=lpINCb8ZIA&sig=9fCMYtNuXVeXtZtrATICWYSFUOk#v=onepage&q=Introduction%20to%20UAV%20Systems&f=false>>. Acesso em: 19 dez. 2015.

FASSNACHT, F. E. et al. Importance of sample size, data type and prediction method for remote sensing-based estimations of aboveground forest biomass. **Remote Sensing of Environment**, v. 154, p. 102-114, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425714003022>>. Acesso em: 19 dez. 2015.

FAVARIN, J. A. S. et al. Obtenção de fotografias aéreas de um povoamento de Pinus taeda L. com o VANT Microdrone MD4-1000. **Simpósio Brasileiro De Sensoriamento Remoto**, v. 16, p. 9340-9346, 2013. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1070.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2015.



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. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/7/1/1074/htm>>. Acesso em: 16 dez. 2015.

FLYNN, K. F.; CHAPRA, S. C. Remote sensing of submerged aquatic vegetation in a shallow non-turbid river using an unmanned aerial vehicle. **Remote Sensing**, v. 6, n. 12, p. 12815-12836, 2014. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/6/12/12815/htm>>. Acesso em: 14 dez. 2015.

FISHER, Robert B. et al. **Dictionary of computer vision and image processing**. John Wiley & Sons, 2013. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=TaEQAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT8&dq=Dictionary+of+Computer+Vision+and+Image+Processing.+Wiley,+Chichester&ots=UYBtoxxod2&sig=Zm0a7\\_Kb8P7FMG6rty8LsIEnVEM#v=onepage&q=Dictionary%20of%20Computer%20Vision%20and%20Image%20Processing.%20Wiley%2C%20Chichester&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=TaEQAgAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT8&dq=Dictionary+of+Computer+Vision+and+Image+Processing.+Wiley,+Chichester&ots=UYBtoxxod2&sig=Zm0a7_Kb8P7FMG6rty8LsIEnVEM#v=onepage&q=Dictionary%20of%20Computer%20Vision%20and%20Image%20Processing.%20Wiley%2C%20Chichester&f=false)>. Acesso em: 15 dez. 2015.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION. **FAO Production Year Book**. Rome, FAO, 2013. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>>. Acesso em: 18 dez. 2015.

GARNETT, T. et al. Sustainable intensification in agriculture: premises and policies. **Science**, v. 341, n. 6141, p. 33-34, 2013. Disponível em: <<https://www.expo.cnr.it/it/system/files/Science-2013-Garnett-33-4.pdf>>. Acesso em: 17 dez. 2015.

GLADE, D. **Unmanned aerial vehicles: Implications for military operations**. Air University Press Maxwell Air force base, Alabama, 2000. Disponível em: <<http://www.au.af.mil/au/awc/awcgate/cst/csat16.pdf>>. Acesso em: 10 dez. 2015.

GOESELE, M. et al. Multi-view stereo for community photo collections. In: Computer Vision, 2007. ICCV 2007. **IEEE 11th International Conference on**. IEEE, 2007. p. 1-8. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4408933](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4408933)>. Acesso em: 17 dez. 2015.

GOMES, L. N. AutoCAD e receptor GNSS de mapeamento na aferição de georreferenciamento de áreas agrícolas a partir de fotos aéreas obtidas por Drone. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 17, p. 1360-1367, 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0293.pdf>>. Acesso em 17 dez. 2015.

GOMEZ, C. Structure-from-Motion and Wavelet Decomposition for outcrop analysis. **Technical Paper in HAL Archives en Ligne**. p. 15. 2014. Disponível em: <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00939994/>>. Acesso em: 17 dez. 2015.

GUARESCHI, Roni Fernandes et al. Produção de silagem de híbridos de milho e sorgo sem nitrogênio de cobertura em safra de verão. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.

40, n. 4, p. 541-546, 2010. Disponível em:

<<http://www.scielo.br/pdf/pat/v40n4/a21v40n4.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2015.

HAALA, N.; CRAMER, M.; ROTHERMEL, M. Quality of 3D point clouds from highly overlapping UAV imagery. *ISPRS–Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inform. Sci.*, XL-1 W, v. 2, p. 183-188, 2013. Disponível em:

<[https://www.researchgate.net/profile/Norbert\\_Haala/publication/274676510\\_QUALITY\\_OF\\_3D\\_POINT\\_CLOUDS\\_FROM\\_HIGHLY\\_OVERLAPPING\\_UAV\\_IMAGERY/links/552e2ea30cf22d43716deb09.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Norbert_Haala/publication/274676510_QUALITY_OF_3D_POINT_CLOUDS_FROM_HIGHLY_OVERLAPPING_UAV_IMAGERY/links/552e2ea30cf22d43716deb09.pdf)>. Acesso em: 18 dez. 2015.

HAARBRINK, R. B.; KOERS, E. Helicopter UAV for photogrammetry and rapid response. In: **International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Workshop of Inter-Commission WG I/V, Autonomous Navigation, Antwerp**, Belgium. 2006. Disponível em: <

<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.222.4943&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 11 dez. 2015.

HONKAVAARA, E. et al. Processing and assessment of spectrometric, stereoscopic imagery collected using a lightweight UAV spectral camera for precision agriculture. *Remote Sensing*, Finland, v. 5, n. 10, p. 5006-5039, oct 2013. Disponível em: <

<http://www.mdpi.com/2072-4292/5/10/5006/htm>> Acesso em: 10 dez. 2015.

HUNT JR, E. R. et al. Evaluation of digital photography from model aircraft for remote sensing of crop biomass and nitrogen status. *Precision Agriculture*, v. 6, n. 4, p. 359-378, 2005. Disponível em: < <http://link.springer.com/article/10.1007/s11119-005-2324-5#/page-1>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

HUNT, E. R. et al. Acquisition of NIR-green-blue digital photographs from unmanned aircraft for crop monitoring. *Remote Sensing*, v. 2, n. 1, p. 290-305, 2010. Disponível em: < <http://www.mdpi.com/2072-4292/2/1/290>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

IMMERZEEL, W. W. et al. High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles. *Remote Sensing of Environment*, v. 150, p. 93-103, 2014. Disponível em: <

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003442571400176X>> Acesso em: 14 dez. 2015.

JANNOURA, R. et al. Monitoring of crop biomass using true colour aerial photographs taken from a remote controlled hexacopter. *Biosystems Engineering*, v. 129, p. 341-351, 2015. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1537511014001998>>. Acesso em: 19 dez. 2015.

JÚNIOR, E. de A. S.; DE SOUZA, N. M.; LIMA, C. H. R. Avaliação dos Dados de Alta Resolução Espacial Obtido por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) para Produção de Modelo Digital de Terreno. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 17, p. 100-107, 2015. Disponível em:

<<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0025.pdf>>. Acesso em 17 dez. 2015.

LATIFI, H. et al. Stratified aboveground forest biomass estimation by remote sensing data. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 38, p. 229-241, 2015. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0303243415000264>>. Acesso em: 19 dez. 2015.

LAURIN, G. V. et al. Above ground biomass estimation in an African tropical forest with lidar and hyperspectral data. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 89, p. 49-58, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924271614000045>>. Acesso em: 19 dez. 2015.

LELONG, C. CD et al. Assessment of unmanned aerial vehicles imagery for quantitative monitoring of wheat crop in small plots. **Sensors**, v. 8, n. 5, p. 3557-3585, 2008. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/8/5/3557/htm>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

LILLESAND T. M.; KIEFER R. W.; CHIPMAN J. W. **Remote Sensing and Image Interpretation**. John Wiley & Sons, 2008. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books/about/Remote\\_sensing\\_and\\_image\\_interpretation.html?id=XaIsAQAAMAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.br/books/about/Remote_sensing_and_image_interpretation.html?id=XaIsAQAAMAAJ&redir_esc=y)>. Acesso em: 19 dez. 2015.

LUCIEER, A. et al. HyperUAS—Imaging spectroscopy from a multirotor unmanned aircraft system. **Journal of Field Robotics**, Australia, v. 31, n. 4, p. 571-590, mar 2014. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rob.21508/abstract>>. Acesso em: 10 dez. 2015.

MANCINI, F. et al. Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments. **Remote Sensing**, v. 5, n. 12, p. 6880-6898, 2013. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/2072-4292/5/12/6880/htm>>. Acesso em: 17 dez. 2015.

MATTIELLO, C. D. et al. Controle de Atitude para Veículos Aéreos Não Tripulados do Tipo Quadricóptero: PID vs Lógica Fuzzy. **Computer on the Beach**, Florianópolis, p. 111-120, mar 2015. Disponível em: <<http://www6.univali.br/seer/index.php/acotb/article/view/7017>> Acesso em: 10 dez. 2015.

MAZA, I. et al. Experimental results in multi-UAV coordination for disaster management and civil security applications. **Journal of intelligent & robotic systems**, v. 61, n. 1-4, p. 563-585, jan 2011. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s10846-010-9497-5#page-1>>. Acesso em: 13 dez. 2015.

MELLO, RENIUS et al. Características produtivas e qualitativas de híbridos de milho para produção de silagem. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 4, n. 01, 2010. Disponível em: <[http://rbms.cnpms.embrapa.br/index.php/ojs/article/view/129/pdf\\_298](http://rbms.cnpms.embrapa.br/index.php/ojs/article/view/129/pdf_298)>. Acesso em: 16 dez. 2015.

MERINO, L. et al. An unmanned aircraft system for automatic forest fire monitoring and measurement. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 65, n. 1-4, p. 533-548, jan 2012. Disponível em: < <http://link.springer.com/article/10.1007/s10846-011-9560-x>>. Acesso em: 14 dez. 2015.

MCGONIGLE, A. J. S. et al. Unmanned aerial vehicle measurements of volcanic carbon dioxide fluxes. **Geophysical research letters**, v. 35, n. 6, 2008. Disponível em:< <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2007GL032508/full>>. Acesso em: 12 dez. 2015.

MOUTINHO, O. et al. MICMAC: UMA ALTERNATIVA OPEN SOURCE PARA FOTOGRAMETRIA COM RPAS. **SASIG**, 2015. Disponível em: <[http://osgeopt.pt/sasig2015/files/03\\_Oscar\\_Moutinho\\_SASIG2015.pdf](http://osgeopt.pt/sasig2015/files/03_Oscar_Moutinho_SASIG2015.pdf)>. Acesso em: 17 dez. 2015.

MURTIYOSO A. D.; SUWARDHI D. A comparison of sparse and dense point approach to photogrammetric 3d modeling for stone textured objects (case study: archeological sites). In: **10<sup>th</sup> Annual Asian Conference & Exhibition on Geospatial Information, Technology & Applications**. Indonesia: Asia Geospatial Forum, 2011. p. 1-8. Disponível em: <[http://www.asiageospatialforum.org/2011/proceeding/pps/arnadi\\_AGF.pdf](http://www.asiageospatialforum.org/2011/proceeding/pps/arnadi_AGF.pdf)>. Acesso em: 17 dez. 2015.

NEBIKER, S. et al. A light-weight multispectral sensor for micro UAV- Opportunities for very high resolution airborne remote sensing. **The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences**, v. 37, p. 1193-1200, 2008. Disponível em: < [http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1\\_pdf/204.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/XXXVII/congress/1_pdf/204.pdf)>. Acesso em: 15 dez. 2015.

NEITZEL, F.; KLONOWSKI, J. Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. **Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.**, v. 38, p. 1-6, 2011. Disponível em: <[http://i3mainz.hsmainz.de/sites/default/files/public/data/uavg\\_neitzel\\_klonowski.pdf](http://i3mainz.hsmainz.de/sites/default/files/public/data/uavg_neitzel_klonowski.pdf)>. Acesso em: 27 dez. 2015.

OLIVEIRA, F. C., L. de et al. Produtividade e valor nutricional da silagem de híbridos de milho em diferentes alturas de colheita. **R. Bras. Zootec**, v. 40, n. 4, p. 720-727, 2011. Disponível em: < <http://www.scielo.br/pdf/rbz/v40n4/04.pdf>>. Acesso em: 15 jan. 2016.

PEGORARO, A. J.; PHILIPS, J. W. Quadrirotores/Microdrone como Portadores de Geosensores aplicados ao Cadastro Territorial. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 15, p. 8461-8468, 2011. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2011/files/p0521.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2015.

PIX4DMAPPER, 2015. Pix4Dmapper software manual. Disponível em: < <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202557969-Pix4Dmapper-Software-Manual-Table-View>>. Acesso em: 20 dez. 2015.

PURI, A.; VALAVANIS, K. P.; KONTITSIS, M. Statistical profile generation for traffic monitoring using real-time UAV based video data. In: **Control & Automation, 2007. MED'07. Mediterranean Conference on. IEEE, USA, Florida, 2007.** p. 1-6. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4433658&tag=1](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4433658&tag=1)>. Acesso em: 11 dez. 2015.

QUAN, L. **Image-based modeling**. Springer Science & Business Media, 2010. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=dQEWMhjma9sC&oi=fnd&pg=PR10&dq=photogrammetry+autor:QUAN,+Long,+Image-based+modeling,+Springer+Science+%26+Business+Media,+2010.&ots=WP\\_CqZmo3n&sig=fNCwyw5LIRTh7zADqmcQRqeYCLU#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=dQEWMhjma9sC&oi=fnd&pg=PR10&dq=photogrammetry+autor:QUAN,+Long,+Image-based+modeling,+Springer+Science+%26+Business+Media,+2010.&ots=WP_CqZmo3n&sig=fNCwyw5LIRTh7zADqmcQRqeYCLU#v=onepage&q&f=false)>. Acesso em: 17 dez. 2015.

REMONDINO, F. et al. UAV photogrammetry for mapping and 3d modeling—current status and future perspectives. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 38, n. 1, p. C22, 2011. Disponível em: <<http://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XXXVIII-1-C22/25/2011/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

RESTAS, A. Forest fire management supporting by UAV based air reconnaissance results of Szendro fire department, Hungary. In: **Environment Identities and Mediterranean Area, 2006. ISEIMA'06. First international Symposium on. IEEE, jul 2006.** p. 73-77. Disponível em: <[http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs\\_all.jsp?arnumber=4150439](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4150439)>. Acesso em: 13 dez. 2015.

ROBERTSON, D. P.; CIPOLLA, R. Structure from motion. Practical image processing and computer vision. **John Wiley, Hoboken, NJ, USA**, p. 49, 2009.

ROIG, H. L. et al. Uso de câmeras de baixo custo acopladas a veículos aéreos leves no estudo do aporte de sedimentos no Lago Paranoá. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 16, p. 9332-9339, 2013. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1438.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2015.

ROSNELL, T.; HONKAVAARA, E. Point cloud generation from aerial image data acquired by a quadrocopter type micro unmanned aerial vehicle and a digital still camera. **Sensors**, v. 12, n. 1, p. 453-480, 2012. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/12/1/453/htm>>. Acesso em: 16 jan. 2016.

RUBIO, J. M. et al. Imap3d: low-cost photogrammetry for cultural heritage. In: **Proceedings of the CIPA 2005 XX International Symposium, Torino, Italy. Camera and Imaging Products Association. Italy, Torino, 2005.** Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Jose\\_Martinez-Rubio/publication](https://www.researchgate.net/profile/Jose_Martinez-Rubio/publication)>. Acesso em: 12 dez. 2015.

SANTOS, R. D. dos et al. Características agronômicas de variedades de milho para produção de silagem-[doi: 10.4025/actascianimsci. v32i4. 9299](https://doi.org/10.4025/actascianimsci.v32i4.9299). **Acta Scientiarum. Animal Sciences**, v. 32, n. 4, p. 367-373, 2010. Disponível em: <<http://eduem.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAnimSci/article/view/9299>>. Acesso em: 12 jan. 2016.

SHAHBAZI, M. et al. Development and Evaluation of a UAV-Photogrammetry System for Precise 3D Environmental Modeling. **Sensors**, v. 15, n. 11, p. 27493-27524, 2015. Disponível em: <<http://www.mdpi.com/1424-8220/15/11/27493/htm>>. Acesso em: 16 dez. 2015.

SIEBERT, S.; TEIZER, J.. Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. **Automation in Construction**, v. 41, p. 1-14, 2014. . Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580514000193>>. Acesso em: 27 dez. 2015.

SILVA, E. T. de J. B. Veículos aéreos não tripulados: panorama atual e perspectivas para o monitoramento de atividades ilícitas na Amazônia. In: **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. Foz do Iguaçu: INPE, 2013. p. 9324-9331. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1457.pdf>>. Acesso em: 16 dez. 2015.

SILVA, W. F. et al. Avaliação de uso de Veículo Aéreo Não Tripulado-VANT em atividades de fiscalização da Agência Nacional de Águas. **Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, v. 17, p. 1791-1798, 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0345.pdf>>. Acesso em 17 dez. 2015.

SUN, G. et al. Forest biomass mapping from lidar and radar synergies. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 11, p. 2906-2916, 2011. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425711001386>>. Acesso em: 19 dez. 2015.

SWAIN, K. C.; THOMSON, S. J.; JAYASURIYA, Hemantha PW. Adoption of an unmanned helicopter for low-altitude remote sensing to estimate yield and total biomass of a rice crop. **Transactions of the ASAE (American Society of Agricultural Engineers)**, v. 53, n. 1, p. 21, 2010. Disponível em: <<http://naldc.nal.usda.gov/naldc/catalog.xhtml?id=41029>>. Acesso em: 19 dez. 2015.

SZ DJI Technology Co., Ltd. Disponível em: <<http://www.dji.com/>>. Acesso em: 20 dez. 2015.

TAMMINGA, A. et al. Hyperspatial remote sensing of channel reach morphology and hydraulic fish habitat using an unmanned aerial vehicle (UAV): a first assessment in the context of river research and management. **River Research and Applications**, Canada, v. 31, n. 3, p. 379-391, mar 2015. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/rra.2743/full>>. Acesso em: 11 dez. 2015.

TANASE, M. A. et al. Airborne multi-temporal L-band polarimetric SAR data for biomass estimation in semi-arid forests. **Remote Sensing of Environment**, v. 145, p. 93-104, 2014. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425714000492>>. Acesso em: 19 dez. 2015.

ULLMAN, S. The interpretation of structure from motion. **Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences**, v. 203, n. 1153, p. 405-426, 1979. Disponível em: <<http://rspb.royalsocietypublishing.org/content/203/1153/405.short>>. Acesso em: 17 dez. 2015.

VALAVANIS, K. P. (Ed.). **Advances in unmanned aerial vehicles: state of the art and the road to autonomy**. Springer Science & Business Media, 2008. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?hl=ptBR&lr=&id=EsjPyblwMdQC&oi=fnd&pg=PR11&dq=VALAVANIS,+Kimon+P.+%28Ed.%29.+Advances+in+unmanned+aerial+vehicles:+state+of+the+art+and+the+road+to+autonomy.+Springer+Science+%26+Business+Media,+2008.&ots=EPoK3avIsD&sig=Dt6if4A1VrNT5QMInYLOMCQ8w0#v=onepage&q=VALAVANIS%2C%20Kimon%20P.%20%28Ed.%29.%20Advances%20in%20unmanned%20aerial%20vehicles%3A%20state%20of%20the%20art%20and%20the%20road%20to%20autonomy.%20Springer%20Science%20%26%20Business%20Media%2C%202008.&f=false>>. Acesso em: 20 dez. 2015.

VERHOEVEN, G. et al. Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs. **Journal of Archaeological Science**, v. 39, n. 7, p. 2060-2070, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305440312000866>>. Acesso em: 17 dez. 2015.

WANI, A. A.; JOSHI, P. K.; SINGH, O. Estimating biomass and carbon mitigation of temperate coniferous forests using spectral modeling and field inventory data. **Ecological Informatics**, v. 25, p. 63-70, 2015.

WONG, K. C. Survey of regional developments: Civil applications. In: UAV Australia Conference, Melbourne, Australia. **School of Aerospace, Mechanical and Mechatronic Engineering**. 2001. p. 8-9. Disponível em: <[http://sydney.edu.au/engineering/aeromech/wwwuav/papers/UAV\\_civil\\_app.PDF](http://sydney.edu.au/engineering/aeromech/wwwuav/papers/UAV_civil_app.PDF)> Acesso em: 10 dez. 2015.

ZARCO-TEJADA, P. J.; GONZÁLEZ-DUGO, V.; BERNI, J. AJ. Fluorescence, temperature and narrow-band indices acquired from a UAV platform for water stress detection using a micro-hyperspectral imager and a thermal camera. **Remote Sensing of Environment**, v. 117, p. 322-337, 2012. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0034425711003555>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

ZARCO-TEJADA, P. J. et al. Tree height quantification using very high resolution imagery acquired from an unmanned aerial vehicle (UAV) and automatic 3D photo-reconstruction methods. **European journal of agronomy**, v. 55, p. 89-99, 2014. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030114000069>>. Acesso em: 18 dez. 2015.

ZHANG, J. et al. New reflectance spectral vegetation indices for estimating rice nitrogen nutrition iii: development of a new vegetation index based on canopy red-edge reflectance spectra to monitor rice canopy leaf nitrogen concentration. **Sensor Letters**, v. 9, n. 3, p. 1201-1206, 2011. Disponível em: <<http://www.ingentaconnect.com/content/asp/senlet/2011/00000009/00000003/art00041>>. Acesso em: 19 dez. 2015.



## APÊNDICE A – RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO 1

### Agisoft PhotoScan

Processing Report

13 January 2016



## Survey Data

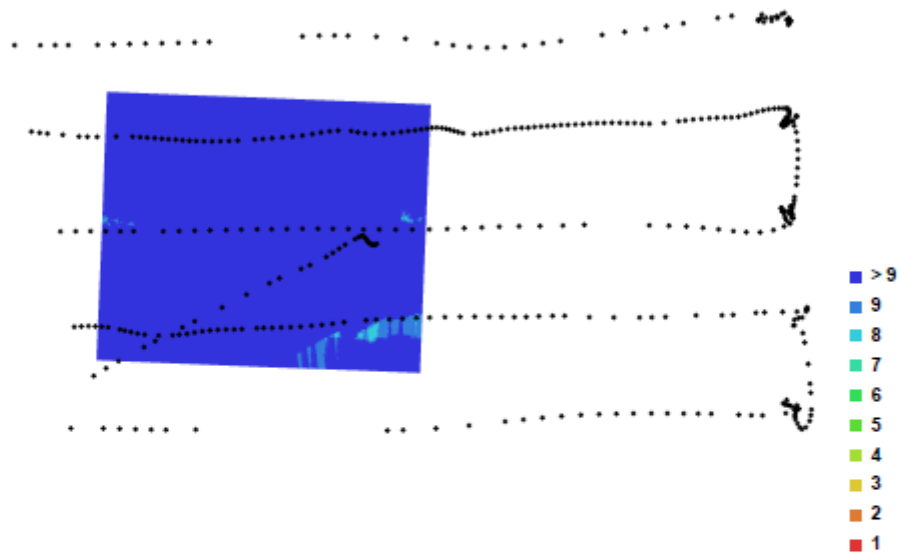


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	427	Camera stations:	416
Flying altitude:	50.3331 m	Tie-points:	17043
Ground resolution:	0.0119175 m/pix	Projections:	62522
Coverage area:	0.0107759 sq km	Error:	1.21627 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
GR (18.3 mm)	4928 x 3264	18.3 mm	4.784 x 4.784 um	Yes

Table. 1. Cameras.

## Camera Calibration

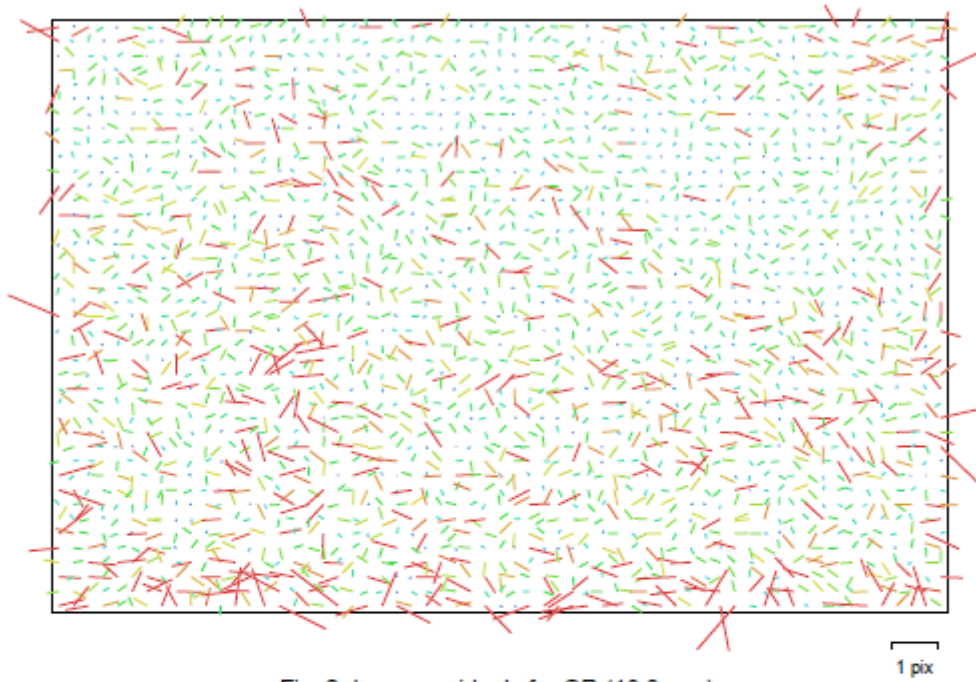


Fig. 2. Image residuals for GR (18.3 mm).

### GR (18.3 mm)

Type:	Frame	K1:	-0.0761058
Fx:	3850.39	K2:	0.140338
Fy:	3851.04	K3:	-0.142671
Cx:	2459.49	K4:	0.101535
Cy:	1630.71	P1:	4.87988e-005
Skew:	0.304745	P2:	0.000198315

## Ground Control Points

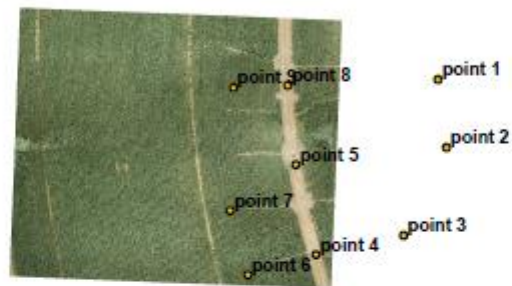


Fig. 3. GCP locations.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
point 1	0.027786	0.008936	0.006151	0.029829	24	0.377963
point 2	0.033323	0.013208	-0.026214	0.044408	10	1.324244
point 3	-0.045538	-0.013915	0.042449	0.063791	8	0.259992
point 4	0.064842	0.211655	-0.056848	0.228548	11	0.230090
point 5	-0.057455	-0.067041	0.047285	0.100157	30	0.190878
point 6	0.044129	0.090639	0.012877	0.101629	11	0.248367
point 7	-0.174201	-0.257508	-0.005159	0.310939	36	0.196469
point 8	0.114443	-0.099809	-0.015656	0.152657	32	0.082860
point 9	-0.006433	0.115427	-0.001572	0.115617	39	0.100451
<b>Total</b>	<b>0.079508</b>	<b>0.128041</b>	<b>0.030613</b>	<b>0.153796</b>	<b>201</b>	<b>0.358704</b>

## Digital Elevation Model

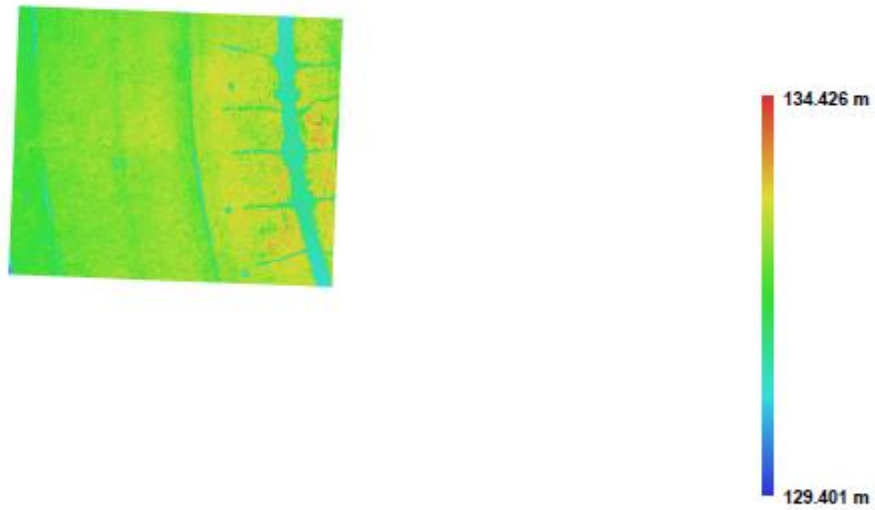


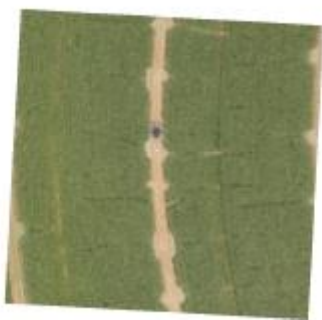
Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.0476699 m/pix  
Point density: 440.06 points per sq m

**APÊNDICE B – RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO 2****Agisoft PhotoScan**

Processing Report

12 January 2016



## Survey Data

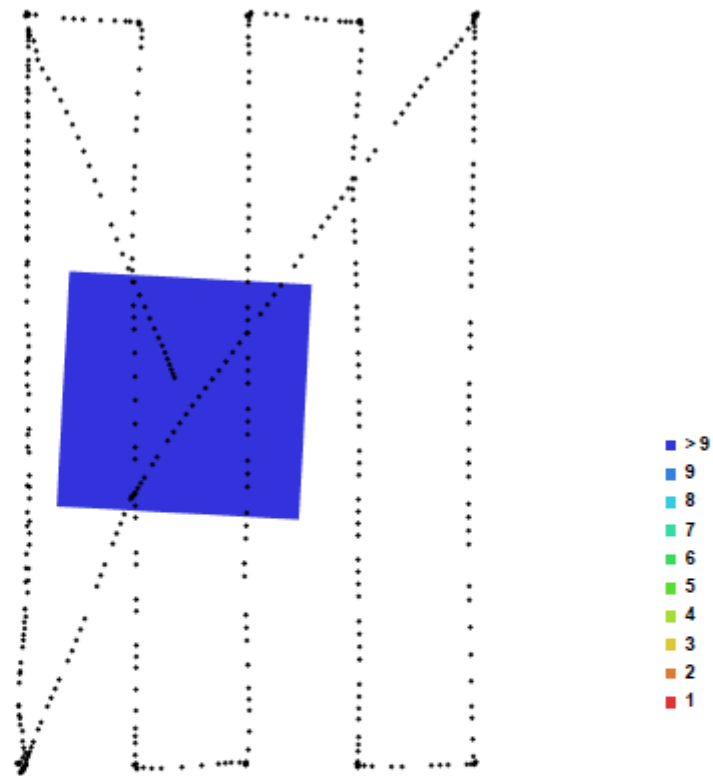


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	485	Camera stations:	485
Flying altitude:	99.3582 m	Tie-points:	3575
Ground resolution:	0.032059 m/pix	Projections:	29358
Coverage area:	0.0100174 sq km	Error:	0.926503 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
HERO4 Silver (3 mm)	4000 x 3000	3 mm	1.73066 x 1.73066 um	No

Table. 1. Cameras.

## Camera Calibration

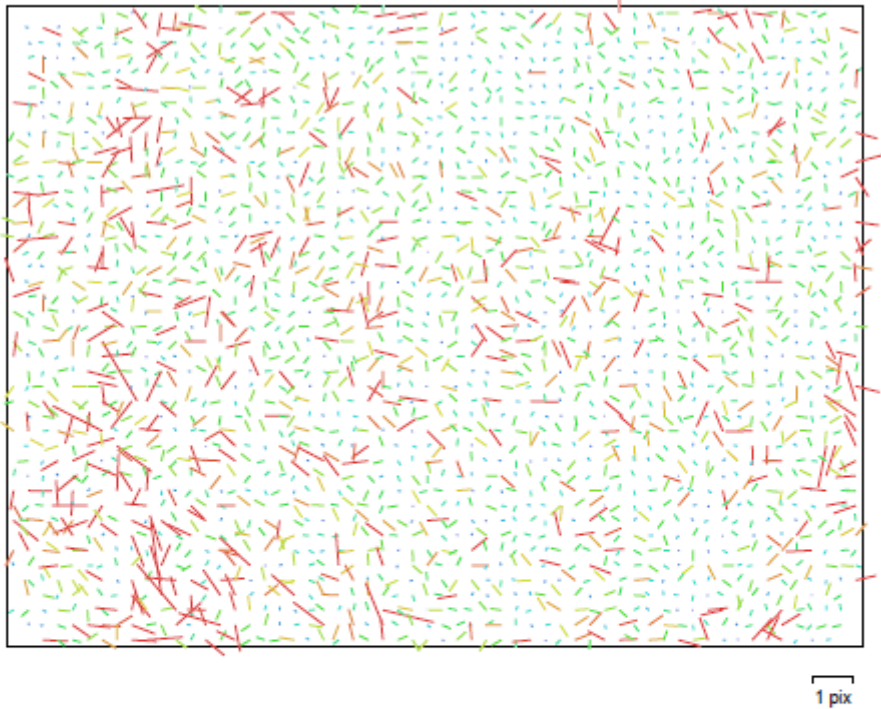


Fig. 2. Image residuals for HERO4 Silver (3 mm).

### HERO4 Silver (3 mm)

Type:	Fisheye	K1:	0.0150061
Fx:	1868.59	K2:	0.0194672
Fy:	1868.59	K3:	-0.00670537
Cx:	1950.81	K4:	0
Cy:	1527.41	P1:	0
Skew:	0	P2:	0



## Ground Control Points

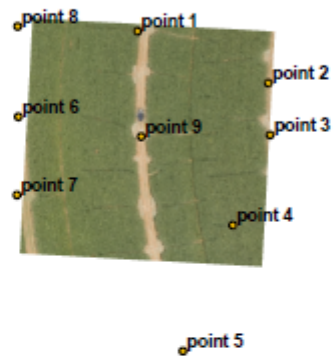


Fig. 3. GCP locations.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
point 1	-0.085859	0.072078	0.267269	0.289827	175	0.265796
point 2	0.063974	-0.072322	-0.346623	0.359821	129	0.007984
point 3	-0.097030	0.116541	0.070311	0.167154	135	0.268638
point 4	0.127497	-0.230532	0.494983	0.560722	127	0.589682
point 5	0.010591	0.019214	-0.204944	0.206115	180	0.147310
point 6	-0.007963	-0.005683	-0.040371	0.041540	129	0.262008
point 7	-0.034687	0.324819	0.085648	0.337707	135	0.289247
point 8	-0.076346	-0.230122	-0.040393	0.245798	144	0.109794
point 9	0.099972	0.006004	-0.286310	0.303322	175	0.096580
<b>Total</b>	<b>0.077701</b>	<b>0.161951</b>	<b>0.253005</b>	<b>0.310286</b>	<b>1329</b>	<b>0.265526</b>

## Digital Elevation Model

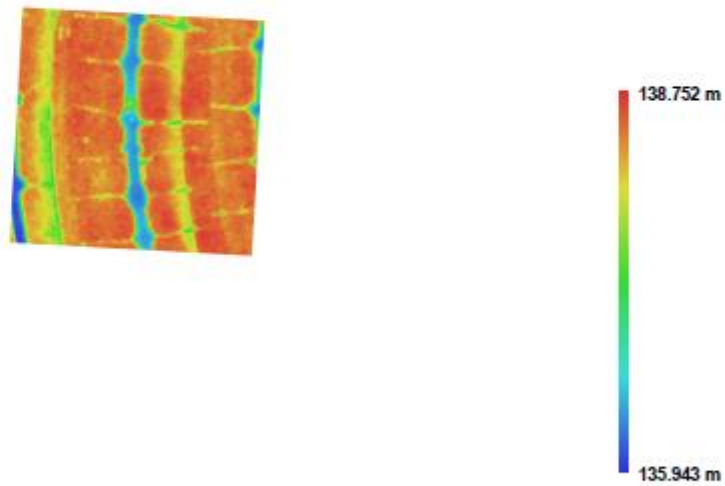


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.128236 m/pix  
Point density: 60.8107 points per sq m

**APÊNDICE C – RELATÓRIO DE PROCESSAMENTO 3****Agisoft PhotoScan**

Processing Report

18 January 2016



## Survey Data

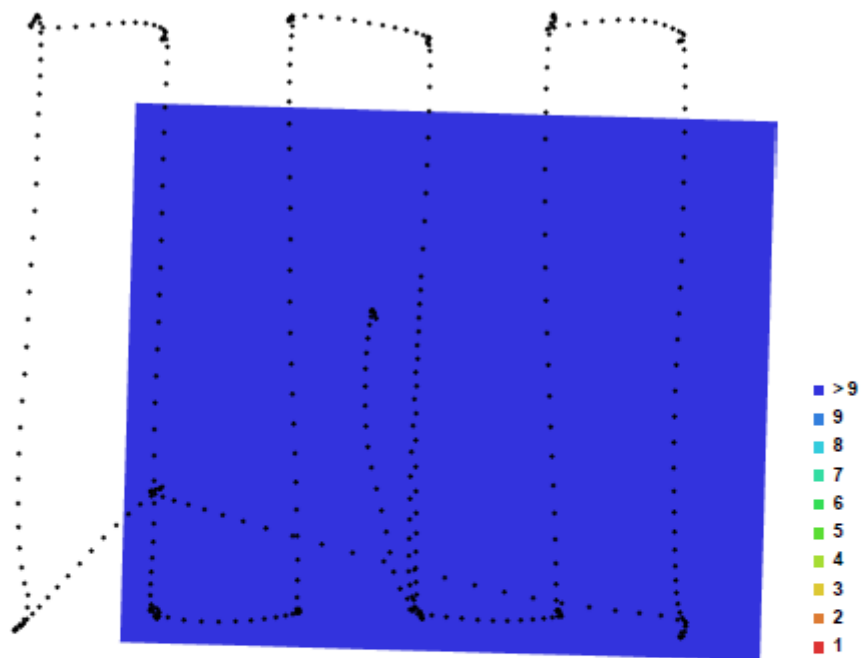


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	388	Camera stations:	388
Flying altitude:	38.4474 m	Tie-points:	24358
Ground resolution:	0.0148901 m/pix	Projections:	105290
Coverage area:	0.0109102 sq km	Error:	1.20934 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
HERO4 Silver (3 mm)	4000 x 3000	3 mm	1.73066 x 1.73066 um	No

Table. 1. Cameras.

## Camera Calibration

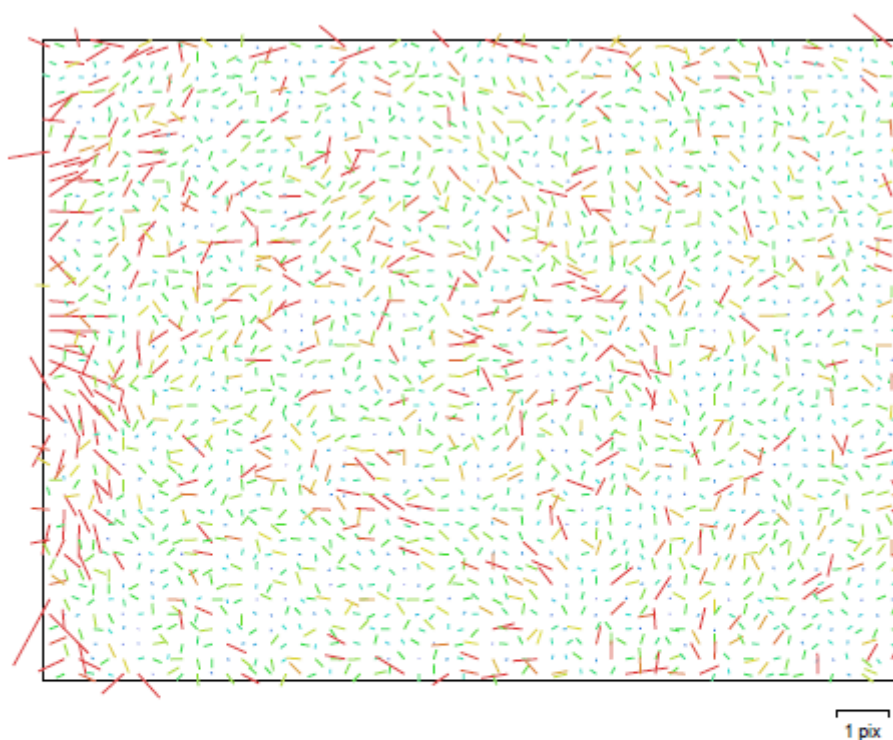


Fig. 2. Image residuals for HERO4 Silver (3 mm).

### HERO4 Silver (3 mm)

Type:	Fisheye	K1:	0.0274736
Fx:	1826.63	K2:	0.0189153
Fy:	1826.63	K3:	-0.00699589
Cx:	1951.76	K4:	0
Cy:	1526.55	P1:	0
Skew:	0	P2:	0

## Ground Control Points

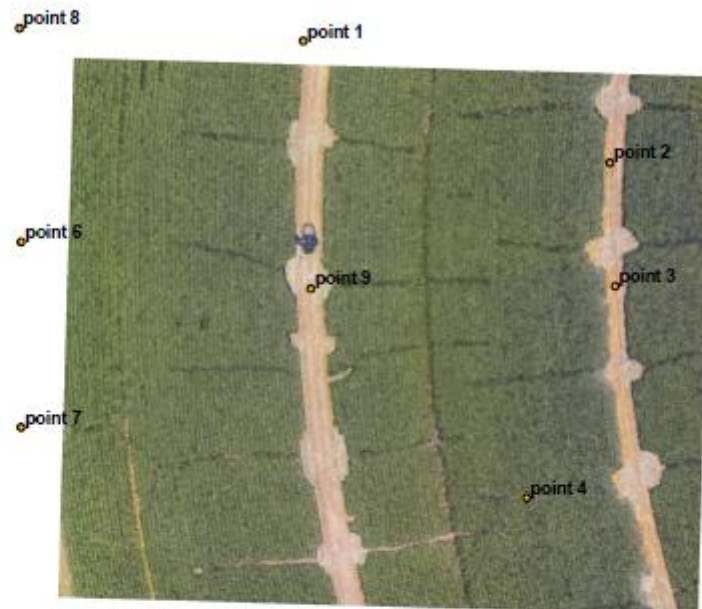


Fig. 3. GCP locations.

Label	X error (m)	Y error (m)	Z error (m)	Error (m)	Projections	Error (pix)
point 1	-0.017685	0.040924	0.136977	0.144050	81	0.119552
point 2	-0.080705	-0.026860	0.218693	0.234652	60	0.213315
point 3	-0.025776	-0.053328	-0.079678	0.099282	88	0.009146
point 4	0.090131	-0.245404	-0.074764	0.271913	100	0.461289
point 6	-0.126329	0.065438	-0.427946	0.450976	108	0.079713
point 7	0.400928	0.219462	0.472105	0.657107	119	2.234529
point 8	-0.223055	-0.024153	0.033398	0.226831	76	0.149285
point 9	-0.018143	0.024351	-0.277819	0.279474	165	0.053815
Total	0.174069	0.122007	0.265247	0.339914	797	0.883569

Table. 2. Control points.

## Digital Elevation Model

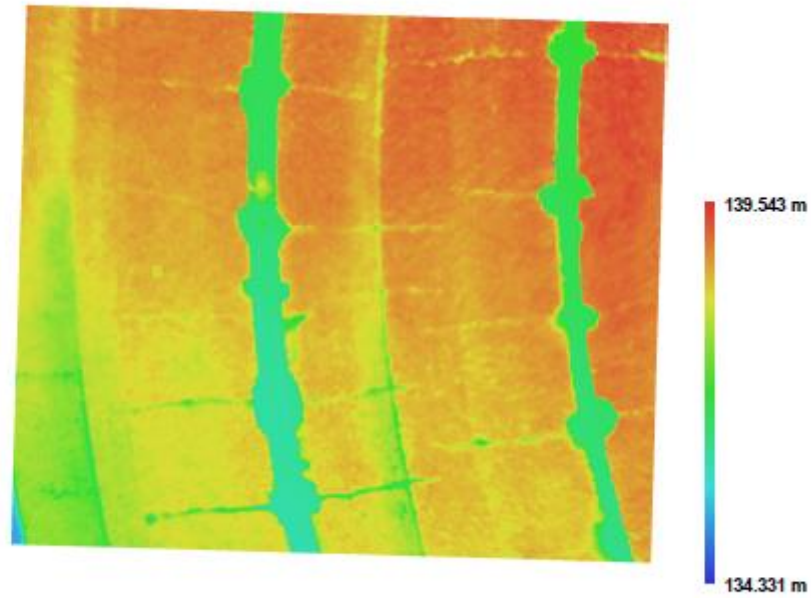


Fig. 4. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.0595605 m/pix  
Point density: 281.892 points per sq m