

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS (UFAL)
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS (CECA)
CURSO DE AGRONOMIA

CHRISTOPHER HORVATH SCHEIBEL

**ESTUDO SOBRE ÍNDICES VEGETACIONAIS UTILIZANDO O IMAGEAMENTO
A PARTIR DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS EM CANA-DE-
AÇÚCAR NO ESTADO DE ALAGOAS**

RIO LARGO – AL

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS (UFAL)
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS (CECA)
CURSO DE AGRONOMIA

CHRISTOPHER HORVATH SCHEIBEL

**ESTUDO SOBRE ÍNDICES VEGETACIONAIS UTILIZANDO O IMAGEAMENTO
A PARTIR DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS EM CANA-DE-
AÇÚCAR NO ESTADO DE ALAGOAS**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
ao Campus de Engenharias e Ciências Agrárias como parte
dos requisitos para a obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo.

Orientador: Prof. Dr. Arthur Costa Falcão Tavares

RIO LARGO – AL

2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

S318e Scheibel, Christopher Horvath.

Estudo sobre índices vegetacionais utilizando o imageamento a partir de aeronaves remotamente pilotadas em cana-de-açúcar no estado de Alagoas / Christopher Horvath Scheibel. – 2023.

75f.: il.

Orientador(a): Arthur Costa Falcão Tavares.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Agronomia) – Graduação em Agronomia, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2023.

Inclui bibliografia

1. Drone. 2. Tecnologia em aquisição de dados. 3. Sensoriamento Remoto. 4. RPAS. I. Título.

CDU: 528.8

FOLHA DE APROVAÇÃO

CHRISTOPHER HORVATH SCHEIBEL

ESTUDO SOBRE ÍNDICES VEGETACIONAIS UTILIZANDO O IMAGEAMENTO A PARTIR DE AERONAVES REMOTAMENTE PILOTADAS EM CANA-DE-AÇÚCAR NO ESTADO DE ALAGOAS

Trabalho de Conclusão de Curso,
apresentado à Coordenação do Curso
de Graduação em Agronomia, da
Universidade Federal de Alagoas,
para obtenção do Título de
Engenheiro Agrônomo e aprovado em
30 de maio de 2023.

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
 ARTHUR COSTA FALCAO TAVARES
Data: 06/06/2023 07:59:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Arthur Costa Falcão Tavares (Orientador)

Documento assinado digitalmente
 HENRIQUE RAVI ROCHA DE CARVALHO ALM
Data: 06/06/2023 08:08:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Henrique Ravi Rocha de Carvalho Almeida

Documento assinado digitalmente
 GABRIEL PAES MARANGON
Data: 06/06/2023 08:48:32-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gabriel Paes Marangon

*A Deus, a meus pais, a minha esposa querida e professores...
pois sem eles, não estaria chegando até aqui...*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram a trilhar neste caminho tão árduo que foi uma parte de minha vida, e a este trabalho de conclusão de curso, sendo primeiramente a Deus, pela minha vida. Ao meu pai (Miguel Scheibel), e mãe (Ilona Maria Stefania Horvath) por ter-me, nos momentos que mais precisei.

A minha querida esposa Sabrina da Hora, pela sua paciência, apoio, compreensão e incentivos dados, nos momentos mais difíceis. A todos os meus familiares que caminharam comigo até o momento por esta longa estrada.

Ao Professor Dr. Arthur Costa Falcão Tavares, pela motivação e apoio tanto técnico e logístico. Ao professor Dr. Gabriel Paes Marangon que me introduziu ao mundo da pesquisa científica, aos professores Jhonathan Gomes dos Santos e Henrique Ravi Rocha de Carvalho Almeida.

Aos professores do curso de Agronomia, Engenharia Florestal, Agrimensura e Agroecologia pela orientação que me conduziu até esse momento, aos alunos João Pedro dos Santos Verçosa, Talvane Couto dos Santos, e a todos que fazem parte do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, um dos melhores lugares para se estar como discente.

“Quero voar pra bem longe, mas hoje não dá...”

Renato Russo

RESUMO

Dado a crescente procura por derivados do setor sucroalcooleiro e a expansão da cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*) no país, o mercado sucroalcooleiro está cada vez mais competitivo, com usinas buscando desenvolver novas alternativas no aumento da produtividade agrícola. Neste cenário de desenvolvimento, os avanços em tecnologias da informação e comunicação estão cada vez mais presentes, desta forma, uma forte relação do gerenciamento com a indústria, utilizando tecnologias de ponta na agricultura, revolucionando o campo. Dentre os exemplos de tecnologias e ferramentas utilizadas, encontram-se drones, utilizados para o monitoramento das lavouras, identificação de falhas no plantio, entre outras atividades. Desta maneira, foi realizado um estudo a partir de dois levantamentos aéreos em área de produtividade agrícola comercial (agronegócio) na cidade de São Miguel dos Campos - AL, no Grupo Luiz Jatobá, levando-se em conta apenas uma resolução espacial dos cultivares da cana-de-açúcar e não o aspecto morfológico e estágio de desenvolvimento da mesma. Foram utilizadas câmeras multiespectrais e RGB, a partir do uso de duas RPAS (Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas). Sendo um *eBee Plus RTK/PPK* e um *Phantom 4 Standard*, além do auxílio de geotecnologias, como posicionamento por satélites - *GNSS* e *INS* (embarcados), e no campo do sensoriamento remoto para a aerofotogrametria digital, se fez do uso do processamento deste dados (imagens aéreas digitais) para a geração de modelos digitais de superfícies (MDS), ortofotos e mapas temático e falsa cor para os índices vegetacionais (imagens multiespectrais), além de ensaios de novos índices para a observância de novos resultados, além da grande relevância na maior celeridade no nível de obtenção de informações preliminares destes locais com o uso de tecnologia RPAS.

Palavras-chave: Drone; Tecnologia em aquisição de dados; Sensoriamento Remoto; RPAS.

ABSTRACT

Given the growing demand for derivatives from the sugarcane sector and the expansion of sugarcane cultivation (*Saccharum officinarum*) in the country, the sugarcane industry market is becoming increasingly competitive, with mills seeking to develop new alternatives to increase agricultural productivity. In this development scenario, advancements in information and communication technologies are becoming increasingly present, thus establishing a strong relationship between management and industry, utilizing cutting-edge technologies in agriculture, revolutionizing the field. Among the examples of technologies and tools used are drones, employed for crop monitoring, identification of planting failures, among other activities. Therefore, a study was conducted based on two aerial surveys in a commercial agricultural productivity area (agribusiness) in the city of São Miguel dos Campos - AL, in the Grupo Luiz Jatobá, considering only the spatial resolution of sugarcane cultivars and not their morphological aspect or stage of development of the same. Multispectral and RGB cameras were used, utilizing two Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS): an eBee Plus RTK/PPK and a Phantom 4 Standard. In addition to the aid of geotechnologies, such as satellite positioning - GNSS and INS (onboard), and in the field of remote sensing for digital aerial photogrammetry, the processing of these data was used (digital digital images) for the generation of digital models of surfaces (MDS), orthophotos and thematic maps and false color for vegetation index (multispectral images), in addition to tests of new indices for the observation of new results, in addition to the great blessing at the highest speed in terms of obtaining preliminary information at these locations using RPAS technology.

Keywords: Drone; Data acquisition technology; Remote sensing; RPAS

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Colheitadeira automatizada com navegação por GPS RTK acompanhado por trator puxando chassis de carga.....	28
Figura 2.	Definição do comprimento de onda, e a frequência da radiação eletromagnética que acompanha, consequentemente definido o número de ondas por comprimento.....	31
Figura 3.	O espectro eletromagnético.....	32
Figura 4.	NDVI aplicado a uma nuvem de pontos durante o processamento de imagens dentro do <i>Agisoft Metashape</i>	40
Figura 5.	Índice de refletância entre uma folha morta, estressada e saudável, quanto mais próximo do ideal da sanidade da planta, maior será o valor do NDVI.....	40
Figura 6.	<i>eBee Plus RTK/PPK</i> versão 2018, na visão frontal superior.....	46
Figura 7.	Local de aquisição das imagens, indo da imagem geral do Brasil, para o estado de Alagoas, ao município de São Miguel dos Campos, e a marcação final do talhão aonde foi realizado o estudo.....	48
Figura 8.	Método direto e inverso da geração de ortofoto.....	49
Figura 9.	<i>Software</i> para <i>Windows</i> da <i>eMotion Sensefly</i> para aeronaves <i>eBee</i>	50
Figura 10.	Captura de tela do próprio aplicativo Drone Deploy no momento de criação de uma missão teste para voo.....	51
Figura 11.	Das várias capturas de tela do tablet utilizado no projeto, dentro do aplicativo UAV Forecast, em dias e épocas diferentes, com distancias variando entre 1.500 metros a 200 metros do local onde seria iniciado os trabalhos de tomada de fotos no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias de Alagoas – CECA / UFAL.....	53
Figura 12.	Relação do GSD x altura do voo, ou mesmo para um terreno acidentado varia de acordo com a altitude do RPA/VANT.....	55
Figura 13.	Relação das formulas para se descobrir o GSD da foto, e o tamanho total em metros quanto ao comprimento e a largura do terreno que foi fotografado pela câmera embarcada.....	57
Figura 14.	A figura mostra como é feito em teoria os voos de recobrimento aéreo com fotogrametria, é necessário um recobrimento lateral e um recobrimento longitudinal que possibilitará a reconstituição de várias fotos em uma única	

	ortofoto.....	58
Figura 15.	Configurações e calibrações básicas necessárias antes de iniciar o procedimento de alinhamento das fotos dentro do programa <i>Agisoft Metashape</i> . Como parâmetros das coordenadas utilizadas e distancia da captura das imagens, análise de foco, tipo, bandas e configurações extras advindas do GPS/GNSS das imagens ou de equipamentos externos.....	62
Figura 16.	Diferenças entre alinhamento de imagens, do primeiro procedimento realizando para que seja possível criar a nuvem de pontos, MDS e ortomosaico dentro do programa <i>Agisoft Metashape</i> . E da nuvem de pontos, da qual já podemos obter uma MDS e ortomosaico.....	63
Figura 17.	Procedimento de alinhamento das fotos dentro do programa <i>Agisoft Metashape</i> , em caso onde não foi possível fazer o alinhamento das fotos, e da utilização de imagens de outra câmera com <i>gimbal</i> , na mesma localidade....	64
Figura 18.	Exemplo de fotos no momento de sua tomada sendo representada dentro do programa <i>Agisoft Metashape</i> . Em um RPAS asa fixa sem <i>gimbal</i> e em um RPAS de asa rotativa com <i>gimbal</i>	65
Figura 19.	Ortomosaico baseado na câmera do <i>Phantom 4 Standard</i> , e índices falsa cor de NDVI, SAVI, OSAVI.....	67
Figura 20.	Ortomosaico de falsa cor dos índices NDWI, OSAVI e GNDVI.....	68
Figura 21.	Ortomosaico de falsa cor dos índices NDRE, (B) RBcl, (C) OSAVI.....	69
Figura 22.	Ortomosaico de falsa cor dos índices NDWI, GBcl, Output 13, Output 11..	70
Figura 23.	Ortomosaico MDS, e de falsa cor dos índices Output 13, Output 11.....	71
Figura 24.	Ortomosaico MDS, e de falsa cor dos índices Output 15, Output 11.....	71
Figura 25.	Ortomosaico de falsa cor dos índices NDVI, sPRI, e CO2flux.....	72
Figura 26.	Histograma de ajuste automático de Output 13, NDWI, Output 11 e ajuste manual de Output 15.....	73
Figura 27.	Histograma de ajuste automático de NDVI, SAVI, OSAVI, GNDVI, NDWI e Output 11.....	73
Figura 28.	Gráfico de correlação entre os índices vegetacionais.....	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.	Quadro do local e da quantidade de imagens obtidas a partir de RPAS asa fixa e asa rotativa, câmera RGB e multiespectral.....	59
------------------	---	----

LISTA DE ORGANOGRAMAS

- Organograma 1.** Como funciona cada tipo de tecnologia GNSS para a agricultura de precisão de uma RPAS utilizada em campo, além da RPAS é necessário uma base fixa, de preferência, compatível com todo os equipamentos presentes.....36
- Organograma 2.** Sequência de observações necessárias antes da ida ao campo para a captura de dados utilizando-se RPAS. As principais são condições meteorológicas, como chuvas e o índice Kp (tempestades solares).....54
- Organograma 3.** Sequência de medidas tomadas quanto ao voo e na aquisição de imagens.....55

LISTA DE FÓRMULAS

Fórmula 1.	NDVI.....	38
Fórmula 2.	NDWI.....	41
Fórmula 3.	SAVI.....	41
Fórmula 4.	OSAVI.....	41
Fórmula 5.	GNDVI.....	42
Fórmula 6.	PRI.....	42
Fórmula 7.	sPRI.....	43
Fórmula 8.	CO ₂ flu.x.....	43
Fórmula 9.	NDRE.....	44
Fórmula 10.	GBCI.....	57
Fórmula 11	Índice Teste 1.....	57
Fórmula 12	Índice Teste 2.....	57
Fórmula 13	Índice Teste 3.....	57
Fórmula 14	sPRI modificada.....	58

LISTA DE ABREVIACES

BLE	Bluetooth de baixa energia – <i>Bluetooth Low Energy</i>
BVLOS	Além da linha de visada – <i>Beyond Visual Line of Sight</i>
CECA	Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
DECEA	Departamento de Espaço Aéreo
EPS	Poliestireno Expandido
ESC	Controlador Eletrnico de Velocidade - <i>Electronic Speed Controler</i>
FAPEAL	Fundo de Amparo  Pesquisa do Estado de Alagoas
GBCI	Indice de Clorofila de Borda Verde – <i>Green Border Chlorophyll</i>
GNDVI	ndice de Vegetao de Diferença Normalizada Verde – <i>Green Normalized Difference Vegetation Index</i>
GNSS	Sistema Global de Navegao por Satelite - <i>Global Navigation Satellite System</i>
GPS	Posicionamento Global por Satelite - <i>Global Positioning by Satellite</i>
GSD	Distância de amostra de solo - <i>Ground Sample Distance</i>
ICA	Instruo do Comando da Aeronáutica
IMU	Unidade de Medida Inercial - <i>Inertial Measurement Unit</i>
IR	Infravermelho - <i>Infrared</i>
IVP	Infravermelho Próximo - <i>Red Edge</i>
IV	ndice Verde - <i>Green Index</i>
KV	Rotaes por minutos dividido pela voltagem (RMP/volts)
LiFe	Fosfato de Lítio de Ferro
LiIon	Lítio Inico
LiPo	Polímero de Lítio

MDS	Modelo Digital de Superfície
MDT	Modelo Digital de Terreno
NDVI	Índice de Vegetação da Diferença Normalizada - <i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NDWI	Índice de Água por Diferença Normalizada – <i>Normalized Difference Water Index</i>
NiMh	Níquel Metal Hidreto
OSAVI	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Otimizado – <i>Optimized Soil Adjusted Vegetation Index</i>
PPK	Cinemática pós processada – <i>Post Processed Kinematics</i>
QGIS	<i>Quantum Geographic Information System</i>
RC	Rádio Controle
RE	Infravermelho Próximo - <i>Red Edge</i>
RGB	Vermelho, Verde, Azul - <i>Red, Green, Blue</i>
RPA	Aeronave Remotamente Pilotada - <i>Remotely Piloted Aircraft</i>
RPAS	Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada - <i>Remotely Piloted Aircraft System</i>
RPS	Estação de Pilotagem Remota - <i>Remote Pilot Station</i>
RTF	Pronto para voar - <i>Ready to Fly</i>
RTK	Cinemática em Tempo Real - <i>Real Time Kinematics</i>
SAVI	Índice de Vegetação Ajustado ao Solo – <i>Soil Adjusted Vegetation Index</i>
SDK	Kit de Desenvolvimento de <i>Software</i> – <i>Software Development Kit</i>
SIRGAS	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SIG	Sistema Integrado Geográfico
UHF	Ultra High Fertilizante
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado

VLOS	Linha de Visada - <i>Visual Lign-Of-Sign</i>
VMC	Condição Meteorológica de Visualização - <i>Visualization Meteorological Condition</i>
WGS	Sistema Mundial Geodésico - <i>World Geodetic System</i>
XPS	Poliestireno Estendido

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	Objetivos.....	22
1.1.1	Geral.....	22
1.1.2	Específicos	22
1.2	Justificativa	23
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
2.1	Agricultura 4.0	24
2.1.1	A importância econômica da cana-de-açúcar no Mundo.....	26
2.1.2	A importância da cana-de-açúcar no Brasil	27
2.1.3	A importância da cana-de-açúcar no estado de Alagoas.....	29
2.2	Sensoriamento Remoto	29
2.2.1	Radiação Eletromagnética.....	30
2.2.2	Espectro Eletromagnético	31
2.2.3	Comportamento Espectral.....	33
2.3	Aerofotogrametria na agricultura de precisão.....	34
2.3.1	Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada	37
2.3.2	Índices vegetativos a partir de câmeras multiespectrais	38
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	Quanto das aeronaves utilizadas	45
3.1.1	eBee Plus RTK/PPK e câmera Parrot Sequoia	45
3.1.2	Drone Phantom 4 Standard	47
3.2	Quanto aos locais da aquisição de imagens	47
3.3	Do início dos trabalhos para a obtenções das imagens até o campo.....	48
3.3.1	Software eMotion da SenseFly para o eBee	49
3.3.2	Aplicativo Drone Deploy	51

3.3.3 Das condições climáticas e meteorológicas	52
3.3.4 Revisão Pré-voo	53
3.3.5 Para o plano de voo	54
3.3.6 Das especificações técnicas da tomada de imagens e GSD	55
3.3.7 Sobreposição das fotos longitudinal e transversalmente.....	57
3.3.8 Índices vegetativos utilizados	58
3.3.9 Processamento das imagens com uso de software	59
4. RESULTADO E DISCUSSÃO	61
4.1 Do total das imagens obtidas.....	61
4.2 Utilização de <i>softwares Agisoft Metashape</i> e QGIS	61
4.2.1 Procedimentos básicos para o processamento das imagens (dados).....	61
4.2.2 Alinhamento das fotografias aéreas e nuvem de pontos	62
4.2.3 Geração de MDS e ortofotos.....	65
4.2.4 Interpretação dos índices através de composição de falsa cor	66
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
REFERÊNCIAS	77

1. INTRODUÇÃO

Aparelhos que possam sustentar-se na atmosfera a partir de reações do ar que não sejam as reações do ar contra a superfície da terra são denominadas aeronaves. As aeronaves não tripuladas são operadas sem piloto a bordo e, dentre as não tripuladas, aquelas que são pilotadas por meio de uma Estação de Pilotagem Remota (RPS) são Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) conforme descrito na ICA 100-40 “Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro” (BRASIL, 2015).

As aeronaves remotamente pilotadas são também conhecidas pela palavra drone, advindo do idioma inglês, cujo significado é "zangão" na tradução literal para a língua portuguesa. No Brasil, o investimento na tecnologia drone ganhou força a partir dos anos 2000, mas a pesquisa realizada por meio desta ferramenta tecnológica ainda se encontra incipiente, principalmente no Nordeste e no estado de Alagoas. Por meio de técnicas de aerofotogrametria e sensoriamento remoto, bem como sensores aerotransportados, são adquiridas imagens aéreas, possibilitando a confecção de mapas da superfície imageada.

A possibilidade de extrair informações espaciais com sensores embarcados e equipamentos (receptores GNSS – *Global Navigation Satellite System*) se torna a principal característica do sistema que integra o veículo aéreo não tripulado. O uso desta tecnologia permite rápidas avaliações das áreas imageadas, bem como correções de uma forma dinâmica quando necessárias.

A redução do tamanho dos sensores aliada ao avanço tecnológico possibilitou a construção dos VANTs (veículo aéreo não tripulado) compactos e leves com facilidades de transporte e deslocamento aos locais desejados (LUZ, 2015). De acordo com Aspiazú et. al., (1990) os recursos computacionais, permitem a obtenção dos modelos em perspectiva, ditos modelos digitais de terreno (MDT) ou modelos digitais de superfície (MDS) que reproduzem sobre o plano, graficamente a sensação do relevo terrestre.

A partir da obtenção das imagens aéreas, o leque se abre em relação às possibilidades no processamento, viabilizados a partir de potentes *hardwares* e *softwares*. (LUZ, 2015). A partir da utilização de imagens digitais correspondentes às bandas visível (RGB) e infravermelho próximo (IVP) do espectro eletromagnético, é possível mensurar a interação da vegetação com a radiação eletromagnética e conseqüentemente coletar dados acerca de fitossanidade e morfometria vegetal.

Técnicas de processamento digital de imagens permitem a obtenção de índices de vegetação, a exemplo do NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) que utiliza imagens das bandas do vermelho (visível) e IVP, para ressaltar o comportamento espectral da vegetação em detrimento de outros alvos da superfície sensoriada. Técnicas de sensoriamento remoto vem sendo utilizadas vastamente visando à diminuição de custos e incrementos na obtenção de dados em inventários que completam as informações obtidas em campo, na agricultura de precisão.

Diante da possibilidade de utilização dos VANTs (sendo o termo RPAS o mais utilizado atualmente, direcionado a aparelhos vendidos comercialmente) e de sobrevoos abaixo das nuvens (ideal para áreas úmidas) garante-se uma maior resolução espacial, maior resolução temporal, e consequente aquisição de dados, além da apresentação de valores monetários mais acessíveis.

Entende-se assim que a utilização de uma RPAS como ferramenta na análise e monitoramento agrícola do estado de Alagoas se torna imprescindível para o processo de aquisição de informações espaciais. As informações captadas por equipamentos RPAS, permitiram o desenvolvimento de bancos de dados que forneceram distintas aplicabilidades nos aspectos agrícolas, além da atualização das bases cartográficas de áreas de interesse a baixo custo com vistas à tomada de decisões técnicas como na aplicação de insumos, identificação de falhas de plantio, identificação de zonas de manejo, ou seja, em atividades que auxiliaram no processo de decisão, principalmente quando utilizados recursos que relacionem à agricultura de precisão.

Devido a crescente procura por derivados do setor sucroalcooleiro, como açúcar, etanol e energia renovável, verifica-se a grande importância da cana-de-açúcar na economia brasileira. O Brasil destaca-se como maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com aproximadamente 640 milhões de toneladas processadas na safra de 2017/2018, de acordo com dados divulgados pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar (ÚNICA, 2018), o que resultou em aproximadamente 38,69 milhões de toneladas de açúcar e 27,80 bilhões de litros de etanol para a agroindústria sucroalcooleira (NOVACANA, 2017).

Desta forma, com a expansão do setor sucroalcooleiro no país, aumento na eficiência, produtividade e competitividade na lavoura, e com o mercado sucroalcooleiro cada vez mais competitivo, as usinas vivem uma busca incessante para novas alternativas no desenvolvimento da produtividade agrícola, de forma se estabelecer no mercado de forma competitiva.

Neste cenário de desenvolvimento da produtividade agrícola, os avanços em tecnologias da informação, comunicação e tecnologias aeroespaciais além dos insumos agrícolas, estão cada vez mais presentes e sendo impactantes, permitindo o armazenamento e processamento de

grandes volumes de dados, automatização de processos e o intercâmbio de informações e de conhecimento (MASSRUHÁ; LEITE, 2016).

Entrando dentro do contexto da agricultura 4.0 e relação do gerenciamento com a indústria 4.0, que representa novos processos e produtos originados de avanços tecnológicos, com aplicações em várias áreas do conhecimento (SCHWAB, 2016; CONFEDERAÇÃO DA AGRICULTURA E PECUÁRIA DO BRASIL, 2018). Assim, a agricultura 4.0 utiliza tecnologias de ponta na agricultura, incentivando processos na cadeia de valor agregado da produção agrícola. Esta tecnologia pode ser uma importante revolução no campo, tornando as lavouras mais eficientes e sustentáveis, bem como auxiliando a troca de informações e os processos com as empresas (SIMÕES; SOLER; PY, 2017).

A transformações digitais e a tecnologia aparecem no setor agrícola de várias formas. A automação do processo, como da mão-de-obra, aconteceu com a ascensão de novas ferramentas, inovadoras e independentes (SIMÕES; SOLER; PY, 2017). A ANAC caracteriza as aeronaves com finalidade comercial, corporativa ou experimental como Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA), porem vem sendo adotada cada vez mais em substituição a VANT ou o popular *drone*.

1.1 Objetivos

1.1.1 Geral

O objetivo geral deste trabalho, é realizar uma comparação de índices vegetacionais a partir de imageamento por RPAS, destinados à análise e monitoramento em área de plantio industrial de cana-de-açúcar do Grupo Luiz Jatobá, em São Miguel dos Campos, do estado de Alagoas.

1.1.2 Específicos

- a) Realização de levantamentos aéreos em áreas de cana-de-açúcar, através de um RPAS asa fixa e asa rotativa, com sistemas embarcados, e uma câmera digital não métrica de espectro RGB e multiespectral;
- b) Realizar o processamento destas imagens obtidas pela câmera digital de espectro RGB e multiespectral através de *software* específico, gerando modelos digitais de superfície, elevação e ortomosaico;

c) Comparar índices vegetativos com a utilização de bandas do infravermelho, classificando a partir de cores falsas, definindo assim déficit hídrico e sanidade da cana-de-açúcar da área escolhida;

1.2 Justificativa

Devido à continua expansão das atividades agrícolas no Brasil, assim como a expansão do setor sucroalcooleiro, e das demandas dos produtos finais advindos deste setor como açúcar, etanol e a energia renovável, é importante observar o impacto que novas tecnologias podem trazer a metodologias de gestão no campo, seja ela advinda de imagens de satélites, drones ou mesmo laboratorial, informação e comunicação apresentam nesses setores, em específico, as RPAS. Entender os benefícios e por ventura, possíveis limitações que o emprego de RPAS em conjunto com o sensoriamento remoto a partir de câmeras multiespectrais podem trazer para a agricultura, da produção agrícola em si, assim como no consumo de insumos, e possíveis impactos ambientais.

Desta forma, torna-se importante que seja verificado e analisado o potencial que essas tecnologias trazem para a cadeia sucroalcooleira, desde o plantio até o processamento, o que pode resultar em melhorias gerais na produção de açúcar, etanol ou energia renovável. Vale observar também a respeito do potencial do setor sucroalcooleiro no Brasil, no qual são necessárias, cada vez mais, técnicas de mitigação de custos e melhorias para a produção, dentre os produtos agropecuários, o Brasil se encontra como maior produtor de cana-de-açúcar, café e laranja, já na segunda posição o país tem a produção de soja, fumo e carne bovina, e encontra-se como terceiro maior produtor de milho (IBGE, 2018; VISÃO AGRÍCOLA, 2008). Este trabalho restringe-se apenas a cana-de-açúcar, destacando o setor sucroalcooleiro, devido sua relevância no cenário agrícola brasileiro.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agricultura 4.0

Agricultura 4.0 é um termo que descreve a evolução da agricultura por meio da aplicação de tecnologias de ponta. Essa abordagem da agricultura se concentra em coletar, processar e analisar dados para melhorar a eficiência e a produtividade do setor agrícola. As tecnologias utilizadas incluem sensores, drones, robótica, inteligência artificial, Internet das Coisas (IoT) e sistemas de informação geográfica (GIS).

MASSRUHÁ & LEITE (2016) mostram que as tecnologias de informação e comunicação (TIC) tem contribuído em diversas áreas do conhecimento de forma impactante, permitindo automatização dos processos, armazenamento de dados, a troca de informações e conhecimento. No campo também é possível visualizar o uso dessas tecnologias, que trazem impactos diretos para as cooperativas e agroindústrias, visando melhorias em produtividade, gestão e custos.

Os avanços da tecnologia na agricultura foram responsáveis pelo termo agricultura 4.0, ou agricultura digital, proveniente da indústria 4.0, que representa novos processos originados de avanços tecnológicos de ponta. Um dos principais objetivos da agricultura 4.0 é maximizar a produção agrícola, enquanto minimiza o impacto ambiental. Por meio da coleta e análise de dados em tempo real, os agricultores podem tomar decisões mais informadas sobre quando e como plantar, irrigar e colher suas culturas. Isso leva a uma redução no desperdício de recursos, como água e fertilizantes, e melhora a sustentabilidade da agricultura (figura 1).

A agricultura 4.0 faz referência ao uso destas tecnologias na agricultura, buscando estimular processos de valor agregado no setor agrícola, utilizando sistemas de rastreamento, sensores, câmeras, GPS, algoritmos inteligentes, modelos matemáticos, entre outros, que poderão trazer oportunidades nos processos, produtos e negócios (SIMÕES; SOLER; PY, 2017).

A difusão de informação por meio de tecnologias digitais cresce de forma rápida e geralmente se deve à três fatores principais (MASSRUHA; LEITE, 2017): utilização da base tecnológica pela adoção da forma digital na geração e manipulação de conteúdos; evolução na informática, que facilita o processamento de forma mais rápida, com custos cada vez menores; evolução dos meios de comunicação, possibilitando a expansão da internet. Por meio do uso dessa agricultura digital é possível obter ganhos de produtividade e sustentabilidade, no qual os produtores buscarão inovar para tornar suas lavouras mais eficientes e as usinas

sucroenergéticas poderão utilizar desses benefícios de informação a tempo real (SIMÕES; SOLER; PY, 2017).

Segundo a Associação das Indústrias Sucroenergéticas de Minas Gerais (SIAMIG, 2018) estima-se que 95% do aumento da produção de alimentos será proveniente de tecnologias que auxiliem os produtores na minimização de custos, com maior eficiência, além de maximizar benefícios para as usinas sucroenergéticas por meio da troca de informações. Massruhá; Leite (2016) mostram que a Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (Embrapa) vem priorizando ações de pesquisa e desenvolvimento, inovação e transferência de tecnologia em vários segmentos do agronegócio brasileiro de forma prover uma melhor assimilação pelos produtores rurais na apropriação de tecnologias. Essas ações trazem consequências para as usinas sucroenergéticas, que podem se beneficiar pela aproximação campo-empresa, por meio de eficiência no seu processo produtivo.

Outra vantagem da agricultura 4.0 é a redução da carga de trabalho manual dos agricultores. O uso de drones, robôs e outras tecnologias automatizadas permite que os agricultores realizem tarefas como o monitoramento de culturas e a pulverização de defensivos de forma mais eficiente e precisa.

Segundo a Sociedade Nacional de Agricultura (2016), destacam-se as seguintes aplicações dessas novas tecnologias no campo: sistema de irrigação inteligente, no qual dispositivos acionam um sistema de irrigação para realizar a operação com a quantidade de água e nutrientes necessários (MASSRUHA; LEITE, 2017); agricultura de precisão envolvendo a aplicação de inteligência embarcada, automação e rede de sensores locais para mapeamento de solos, prática que reúne tecnologias que tornam as atividades agrícolas mais precisas e automatizadas (OMEGA AGROSCIENCE, 2016); monitoramento de doenças e de variáveis meteorológicas por meio de sensores, nos quais os dados são trabalhados e gerados os boletins, bem como formas, etapas e manejos do plantio (FACHIN, 2019); sensoriamento remoto, visando obter mais dados sobre a produção e aspectos ambientais e climáticos, por meio de monitoramento remoto e capacidade de intervenção imediata quando necessário (GSI BRASIL, 2018).

No entanto, a implementação da agricultura 4.0 também apresenta desafios. Um dos principais é a própria necessidade de infraestrutura tecnológica descrita assim, além de sensores, redes de comunicação e *software*, também, os agricultores precisam ter treinamento para a melhoria de suas habilidades, e adquirir todos os conhecimentos necessários para operar as tecnologias e interpretar os dados coletados com o máximo de eficiência.

2.1.1 A importância econômica da cana-de-açúcar no Mundo

A cana-de-açúcar é uma das principais culturas agrícolas do mundo, com grande importância econômica em muitos países, especialmente em regiões tropicais e subtropicais. A cana-de-açúcar é cultivada em mais de 100 países, sendo os principais produtores Brasil, Índia e China.

A importância econômica da cana-de-açúcar decorre da sua ampla utilização na produção de açúcar, etanol, biocombustíveis, além de outras aplicações como alimentos, bebidas, produtos farmacêuticos, papel, entre outros. O açúcar é a principal commodity produzida a partir da cana-de-açúcar, sendo utilizado como adoçante em diversos alimentos e bebidas em todo o mundo. O etanol é produzido a partir do açúcar ou do caldo de cana e é amplamente utilizado como biocombustível, podendo ser misturado à gasolina ou utilizado puro em veículos flex fuel. A produção de biocombustíveis a partir da cana-de-açúcar é uma alternativa viável e sustentável aos combustíveis fósseis, contribuindo para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para a segurança energética dos países.

Além da sua importância econômica, a cana-de-açúcar também desempenha um papel social e ambiental significativo. A cultura da cana-de-açúcar é responsável por empregar milhões de pessoas em todo o mundo, especialmente em países em desenvolvimento. (RODRIGUES, 2020).

Diversos estudos têm sido realizados para avaliar o impacto da produção de cana-de-açúcar na economia global. Segundo dados da Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO), a produção mundial de cana-de-açúcar atingiu 1,8 bilhão de toneladas em 2020, com um valor de produção estimado em US\$ 40,2 bilhões. O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com uma produção de 659,8 milhões de toneladas em 2020 e um valor de produção de US\$ 10 bilhões (FAOSTAT, 2019).

Na safra de 2020/21 o Brasil produziu cerca de 39,5 milhões de toneladas de açúcar, o que equivale a 21% da produção mundial, podendo em suas melhores condições gerar um ganho econômico de R\$ 161,75 milhões na região Centro-Sul e R\$ 33,06 milhões no Nordeste. (GARCIA, et al., 2020)

Além disso, estudos têm destacado a importância da produção de biocombustíveis a partir da cana-de-açúcar na redução das emissões de gases de efeito estufa em comparação aos combustíveis fósseis. De acordo com um estudo realizado pela Agência Internacional de Energia (IEA), a produção de etanol a partir da cana-de-açúcar é uma das formas mais eficientes

de reduzir as emissões de gases de efeito estufa em comparação com outros biocombustíveis. (EMBRAPA, 2016).

2.1.2 A importância da cana-de-açúcar no Brasil

A indústria da cana-de-açúcar no Brasil nos últimos anos tem sido alavancada, diante da diversidade de produtos comerciais advindos da moagem da cana-de-açúcar, como açúcar, etanol, cachaça, rapadura, produtos extraídos do caldo e cogeração de energia elétrica com a queima do bagaço, o aumento de veículos com tecnologia flex também propiciou esse aumento (CONAB, 2017). A escala industrial da cana-de-açúcar no Brasil data de meados de 1975. De acordo com a Companhia Nacional de Abastecimento CONAB (2017) é certa a importância estratégica, econômica e de liderança que o setor sucroalcooleiro exerce no Brasil e no mundo.

Hoje, o país é o maior produtor, apresentando aproximadamente 650 milhões de toneladas, seguido por países como Índia, China, Austrália e Tailândia (ÚNICA, 2018). De acordo com a CONAB (2017), o setor sucroenergético engloba uma grande parte dos processos agrícolas do país, que estão concentrados na produção de açúcar, etanol e bioenergia, todos exclusivos do processamento da cana-de-açúcar.

O setor ainda se destaca, visto que o país possui certas características que o diferenciam dos demais países produtores cana-de-açúcar e seus derivados. Verifica-se que no Brasil a maior parte das usinas produzem uma grande quantidade de cana-de-açúcar, os demais países produtores mantêm a atividade agrícola separada da produção industrial (CONAB, 2017). Esse modelo de organização está associado à dimensão territorial do país e à disponibilidade de terras aptas para o cultivo, que produzem cerca de 646,33 milhões de toneladas, com uma produtividade de 73.728 kg/hectare em uma área de aproximadamente 8,76 milhões de hectares (CONAB, 2018; NOVACANA, 2017).

Além disso, a cana-de-açúcar é uma cultura muito importante para a economia brasileira, sendo utilizada para a produção de açúcar, etanol e outros produtos derivados, sendo também, uma cultura de grande importância para a produção de energia renovável, uma vez que além do álcool gerado nas usinas, o bagaço da cana pode ser utilizado na geração de energia elétrica.

No Brasil, a cana-de-açúcar é a principal cultura agrícola, sendo cultivada principalmente nos estados de São Paulo, Minas Gerais e Goiás. A produção de açúcar e etanol a partir da cana-de-açúcar é uma importante fonte de renda para a indústria brasileira, gerando milhares de empregos e contribuindo para a balança comercial do país. Além disso, a cana-de-

açúcar é uma cultura altamente sustentável, uma vez que é capaz de fixar grandes quantidades de carbono, ajudando a combater o aquecimento global (CARVALHO, 2013).

Um dos principais benefícios econômicos da cana-de-açúcar é a geração de energia renovável. Tanto o álcool, quanto o bagaço da cana, que é o resíduo da produção de açúcar e etanol, pode ser utilizado na geração de energia elétrica. Essa energia pode ser utilizada pela própria usina de açúcar e etanol, ou pode ser vendida para a rede elétrica, gerando uma nova fonte de renda para o produtor. A importância econômica da cana-de-açúcar também se estende para a produção de outros produtos derivados, como o álcool etílico, o ácido cítrico e o etileno. O álcool etílico é utilizado como combustível automotivo, reduzindo a dependência do país em relação ao petróleo. O ácido cítrico é utilizado como aditivo alimentar, enquanto o etileno é utilizado na produção de plásticos.

Segundo BUCKERIDGE & CORTEZ (2011), abordam diversos aspectos da produção de cana-de-açúcar, incluindo a importância econômica da cultura, os aspectos tecnológicos da produção de açúcar e etanol, e os impactos ambientais da produção.

Figura 1 - Colheitadeira automatizada com navegação por GPS RTK acompanhado por trator puxando chassis de carga.



FONTE: <https://blog.syngentadigital.ag/> (2023).

2.1.3 A importância da cana-de-açúcar no estado de Alagoas

A cultura canavieira foi um fator importante de formação e desenvolvimento regional no estado de Alagoas. A influência da cultura canavieira vai além dos imensos canaviais que predominam dos tabuleiros costeiros, pois se estendem também temporalmente. (SANTOS, 2011). Os métodos utilizados na área agrícola e industrial do setor sucroalcooleiro alagoano passaram de rudimentares para altamente tecnificados e informatizados. (ANDRADE, 2010).

O deslocamento dos canaviais para as áreas de tabuleiros e interflúvios fizeram com que as usinas alcançassem uma produção bastante expressiva no estado de Alagoas. A Usina Coruripe, que está entre as principais produtoras de cana-de-açúcar, vem se destacando como uma das maiores do nordeste devido ao uso de geotecnologias para aumentar sua produtividade. Porém, até a década de sessenta mantinha uma produção modesta, necessitando expandir seu cultivo de cana-de-açúcar para os tabuleiros. (ANDRADE, 2010).

A região nordeste ao todo, colheu 48,4 milhões de toneladas, representando redução de 1,4%. O estado de Alagoas obteve 17 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, simbolizando redução de 2,5% em relação a 2019/20. (CONAB, 2020). Além disso, a cana de açúcar é responsável por aproximadamente 27% do Produto Interno Bruto (PIB) do Estado de Alagoas, o que representou em 2018 um valor de R\$ 54,413 bilhões, além de proporcionar 120 mil empregos diretos e 270 mil empregos indiretos. (SEPLAG/AL, 2020; SANTOS, 2011).

Têm sido utilizadas técnicas de agricultura de precisão para a cultura da cana-de-açúcar, como o uso de geoprocessamento para analisar a produtividade, o que vêm apresentando resultados econômicos positivos. Com aplicação da agricultura de precisão, observou-se um aumento de US\$ 6.5827 (US\$ 563 /ha) nos últimos 5 anos, comparando-se ao uso de técnicas convencionais. (COX, et al., 2015).

2.2 Sensoriamento Remoto

Com o avanço da tecnologia e o decorrer dos anos os conceitos que fundamentam o sensoriamento remoto foram interpretados e definidos de diversas maneiras. Podemos tomar como definição que sensoriamento remoto é a ciência e a arte de obter informação sobre um objeto (alvo), área ou fenômeno através da análise de dados adquiridos por um dispositivo (sensor) que não está em contato direto com o objeto, área ou fenômeno sob investigação (LILLESAND; KIEFER, 1994).

A técnica de sensoriamento remoto está ligada diretamente a utilização dos sensores, processamento de dados; tendo como finalidade principal reproduzir as atividades que vem ocorrendo na superfície terrestre. Com base nisso, Curran (1985) conceitua essa técnica como uso de sensores de radiação eletromagnética (REM) para registrar imagens que podem ser interpretadas para fornecer informação útil sobre o ambiente.

A energia eletromagnética utilizada na captação dos dados do sensoriamento remoto é definida como radiação eletromagnética. Os dados quantitativos e qualitativos da energia eletromagnética refletida e emitida pelos objetos terrestres resultam das interações entre a energia eletromagnética e estes objetos observados. Sendo assim, a energia eletromagnética refletida e emitida pelos objetos terrestres é a base de dados para todo o processo de sua identificação. Ela permite quantificar a energia espectral refletida e/ou emitida por estes, e assim avaliar suas principais características. Logo, os sensores remotos são ferramentas indispensáveis para a realização de inventários, de mapeamento e de monitoramento de recursos naturais (E. C. MORAES, 2002).

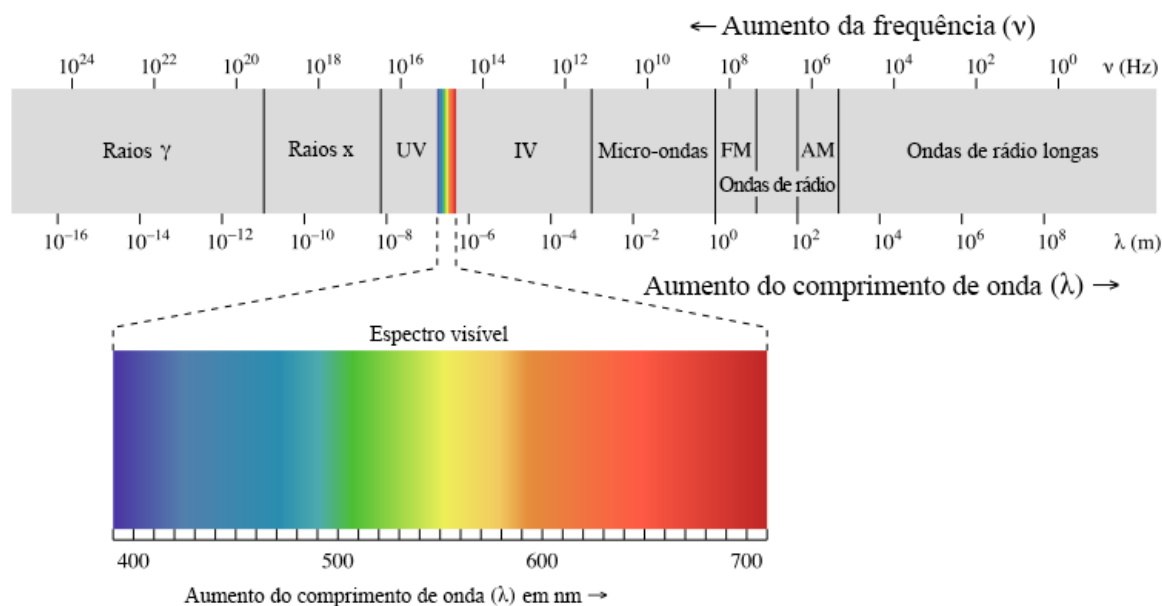
2.2.1 Radiação Eletromagnética

A energia eletromagnética é emitida por qualquer corpo que possua temperatura acima de zero grau absoluto (0 Kelvin). Com base nisso, podemos considerar que todo corpo negro com uma temperatura absoluta acima de zero será considerado fonte de radiação (ROSA, 2013).

O Sol e a Terra são as duas principais fontes naturais de energia eletromagnética utilizadas no sensoriamento remoto da superfície terrestre. A energia solar que alcança a atmosfera e superfície terrestre dirige quase todos os ciclos físicos e biológicos do sistema terra atmosfera de nosso planeta. A energia eletromagnética não precisa de um meio material para se propagar, sendo definida como uma energia que se move na forma de ondas eletromagnéticas à velocidade da luz ($c = 3,0 \times 10^8$ m/s), onde “c” é a velocidade da luz.) (E.C. MORAES, 2002).

A distância entre dois pontos semelhantes, como mostra a figura 2, define o comprimento de onda, o número de ondas que passa por um ponto do espaço num determinado intervalo de tempo e a frequência da radiação eletromagnética (INPE, 2006).

Figura 2. Definição do comprimento de onda, e a frequência da radiação eletromagnética que acompanha, consequentemente definido o número de ondas por comprimento.



Fonte: Khan Academy, <https://pt.khanacademy.org/science/physics/light-waves/introduction-to-light-waves/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>. (2023).

Devido à ordem de grandeza destas variáveis é comum utilizar unidades submúltiplas do metro (micrômetro: $1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m}$, nanômetro: $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) para comprimento de onda e múltiplas do Hertz (quilohertz: $1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$, megahertz: $1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$) para frequência (BORGES, 2009).

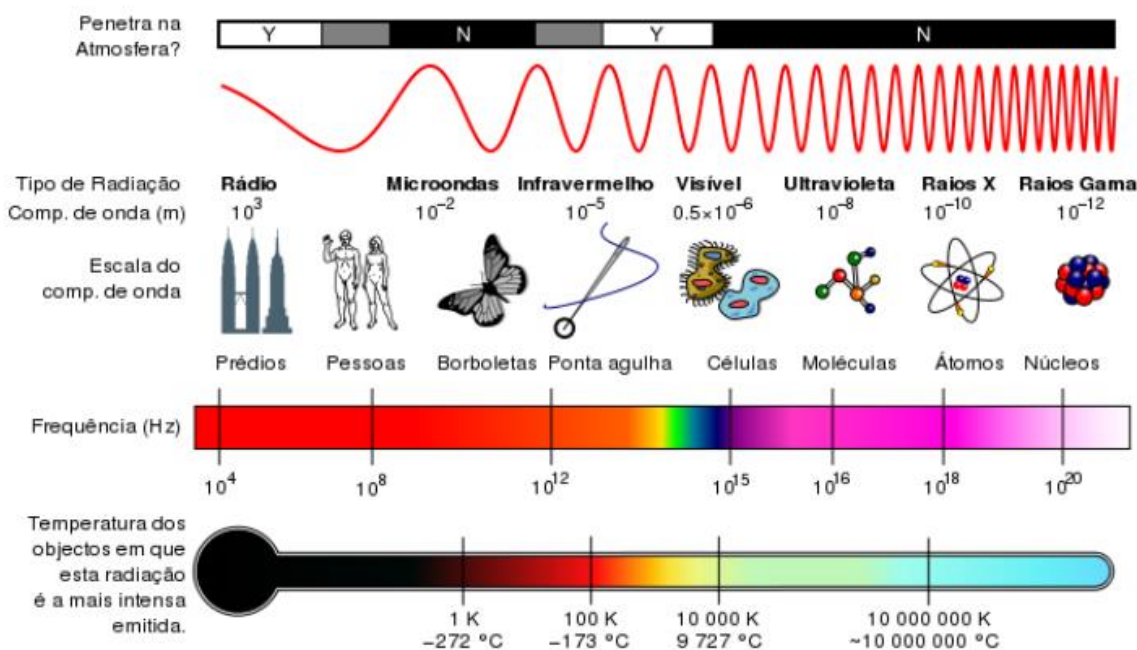
2.2.2 Espectro Eletromagnético

O conjunto de todas as radiações e a ordenação destas radiações em função do comprimento de onda e da frequência desde os raios cósmicos até as ondas de rádio e TV, formam o espectro eletromagnético (BORGES, 2009). O espectro eletromagnético é dividido em dois grupos de acordo com o seu alcance: Espectro Ótico tendo uma variação de comprimento de onda de $0,30$ a $15 \mu\text{m}$, que podem ser refletidos ou refratados com lentes e espelhos e o Espectro Reflexivo, que apresenta uma variação do comprimento de onda de $0,38$ a $3,0 \mu\text{m}$ que está contido na região que é utilizada para o sensoriamento remoto (CAMPBELL, 2011).

A figura 3 demonstra este espectro com todos os tipos de radiação eletromagnética que existem no nosso universo. O espectro eletromagnético é composto por todas as variedades de

radiações existentes. Os raios gama têm a frequência mais alta, enquanto as ondas de rádio têm as mais baixas. A luz visível está, aproximadamente, no meio do espectro e abrange uma fração muito pequena do espectro todo (SOUTO, 2018).

Figura 3. O espectro eletromagnético.



Fonte: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Espectro_Eletromagn%C3%A9tico.png. (2023)

Como podemos observar, o espectro visível — ou seja, a luz que podemos enxergar com nossos olhos — compõe apenas uma pequena fração dos diferentes tipos de radiação que existem. À esquerda do espectro visível, encontramos os tipos de energia de frequência mais baixa (e, portanto, de maior comprimento de onda) que a luz visível. Esses tipos de energia incluem a radiação infravermelha, que são ondas de calor emitidas por corpos térmicos, as micro-ondas e as ondas de rádio. Esses tipos de radiação estão constantemente ao nosso redor e não são prejudiciais, pois suas frequências são muito baixas (Adaptado de PROCÓPIO, 2018).

Na região do infravermelho, apresentam-se duas categorias, sendo elas o infravermelho refletido e o infravermelho termal. O infravermelho refletido é composto pelo infravermelho próximo (NIR) e pelo infravermelho de pequena onda (IVPQ), que é relacionado a radiação solar refletida da Terra (LIEW, 2001), utilizamos o infravermelho próximo para estudar e assim conseguir discriminar os tipos de vegetação e o estado de estresse das plantas (SOUZA; MACHADO; AVACA, 2003).

A região do infravermelho termal é composta por ondas médias e longas, uma das

vantagens do sensoriamento remoto termal, é de proporcionar em tempo sincronizado uma densa rede de dados de temperatura de áreas sobre a superfície terrestre, além de permitir o monitoramento e o estudo multitemporal das mesmas (Adaptado de PROCÓPIO, 2018).

2.2.3 Comportamento Espectral

O fluxo de energia eletromagnética ao atingir a superfície terrestre (energia incidente), interage de modo diferente com cada tipo de alvo, podendo ser refletida, absorvida e/ou transmitida pelo objeto (E.C. MORAES, 2002). A absorção, reflexão e transmissão da energia incidente pode ser total ou parcial, sempre resguardando o princípio da conservação de energia (a energia não pode ser simplesmente dissipada, apenas transformada). A capacidade que um objeto possui de absorver, refletir e transmitir a energia eletromagnética recebem o nome de absortância, reflectância, e transmitância, respectivamente, e seus valores variam de 0 a 1 (FREITAS, BASSO & FERRI, 2015).

Quando a energia eletromagnética incidente em um objeto é refletida pelo mesmo, diz-se que ocorreu reflexão. Essa reflexão pode ser difusa ou especular, como mostrado na figura 6 sendo que as características da reflexão difusa são importantes, pois tornam o estudo da mesma mais fácil, por permitir a simplificação de várias leis físicas. Isso ocorre, pois, independente dos ângulos de incidência e de observação a energia não irá variar. No caso onde a radiação incidente em um objeto não é refletida, mas sim absorvida ou transformada pelo mesmo, diz-se que ocorreu absorção. No caso da transmissão, ela ocorre quando a energia que incide sobre um objeto é capaz de atravessar o mesmo, de forma total ou parcial (FREITAS, BASSO & FERRI, 2015).

As muitas feições da Terra apresentam interação com a radiação de diferentes formas, sendo que as características dessas interações são determinadas pelas diferentes composições físico-químicas e biológicas dos objetos e feições terrestres. Logo, o comportamento espectral de um objeto pode ser definido como sendo o conjunto dos valores sucessivos da reflectância do objeto ao longo do espectro eletromagnético, também conhecido como a assinatura espectral do objeto (SOUZA, 2010).

2.3 Aerofotogrametria na agricultura de precisão

Diante das necessidades mundiais, a busca por maior produção em áreas agricultáveis com menor custo e maior eficiência nas operações tem sido uma constante preocupação de produtores, profissionais e pesquisadores envolvidos na produção agrícola. O desenvolvimento tecnológico tem trazido novas perspectivas e soluções para o manejo de solo, insumos e plantas, unindo conhecimento agrônômico tradicional com ferramentas computacionais e automação. A expressão agricultura de precisão é usada para designar um sistema de produção de uma área específica, em uma escala menor do que a comumente usada.

O termo Agricultura de Precisão vem sendo utilizado no Brasil para designar o sistema de produção adotado por agricultores em outros países denominado de Precision Agriculture, Precision Farming, Sitespecific Crop management (MANZATTO et al., 1999). Assim, a agricultura de Precisão ou manejo sítio-específico é o manejo de lavouras agrícolas ou pecuárias em uma escala espacial menor que aquela normalmente adotada para toda a lavoura (PLANT, 2001; MACHADO, 2004).

Como um novo paradigma para a agricultura atual, a agricultura de precisão é a habilidade de monitorar e acessar a atividade agrícola, precisamente em nível local; tanto que as técnicas de agricultura de precisão devem ser compreendidas como o uso consciente dos recursos naturais. Segundo MANTOVANI apud TSCHIEDEL e FERREIRA (2002), “além de útil à agricultura de precisão, esta definição engloba a ideia de compromisso no uso da terra, com relação às gerações futuras”.

Para o termo Fotogrametria, segundo ROSALEN (1997), é composto por três palavras gregas: foto (luz) + gramma (traçado) + metron (medida) literalmente “medir por meio do traçado da luz”, ou seja, por meio da fotografia que é o registro da luz. Rosalen apud Manual of Photographs (1980), editado pela American Society of Photogrammetry (Associação Americana de Fotogrametria) define a Fotogrametria como: “a ciência ou a arte de se obterem medidas confiáveis por meio de fotografias”. Em ROSALEN (1997), o Sensoriamento Remoto e a Fotogrametria classificam-se em três níveis de coleta de dados: terrestre, aéreo e espacial.

No nível terrestre tem-se uma visão horizontal, pois são obtidas através de câmeras métricas acopladas ou não a teodolitos. Destaca-se que a tecnologia atual permite a realização de Fotogrametria Terrestre com Scanners terrestres ou ainda Estações Totais equipadas com câmeras. O nível aéreo (aerofotogrametria) é viabilizado com a utilização de câmeras fixadas em aviões ou, atualmente, em RPAS.

O espacial é obtido por satélites, ou outros veículos espaciais. Dentre as diferentes geotecnologias utilizadas na agricultura de precisão, a Fotogrametria e o Sensoriamento Remoto destacam-se pela rapidez e qualidade dos dados obtidos, como indica Volterrani (2003), que afirma que através de imagens orbitais é possível identificar espécies vegetais, calcular área foliar, biomassa, cobertura do solo ou ainda quantificar teor de nitrogênio, clorofila, água ou ainda deficiência nutricional.

A importância da Fotogrametria é mundialmente reconhecida, vem se aprimorando e é empregada em diversas áreas como: mapeamento, geologia, engenharia agrônômica e florestal, projetos e construção civil, cadastro urbano e rural, arquitetura, arqueologia, meteorologia, oceanografia, medicina e criminologia (ROSALEN, 1997). A evolução técnica mais intensa da Fotogrametria, segundo ROSALEN (1997), começou na década de 60 do Século XX, pois até a década de 50, a Fotogrametria era mecânica e denominada Fotogrametria Analógica, quando os equipamentos ópticos-mecânicos realizavam o processo de orientação fotogramétrica analogicamente, sendo necessário para essa função técnicos especificamente capacitados. Com o avanço da eletrônica e o surgimento de computadores e o aparecimento dos restituidores analíticos, a partir de 1976, ocorreu uma revolução na Fotogrametria, permitindo a orientação de forma analítica, e não mais analógica, surgindo então a Fotogrametria Analítica.

No início dos anos 80, do século passado, a Fotogrametria Digital teve seu início, tendo como grande inovação a utilização de imagens digitais como fonte primária de dados e não mais de imagens analógicas que ainda eram utilizadas na Fotogrametria Analítica.

A imagem digital pode ser adquirida diretamente de uma câmera digital, ou mesmo através da digitalização de uma imagem analógica (submetendo-a a um scanner). Nos anos 90, esta técnica da Fotogrametria foi usada de maneira extensiva, resultado do desenvolvimento da informática tendo computadores com capacidade suficiente para o processamento de imagens digitais, além de *softwares* específicos, assim como scanners mais eficientes.

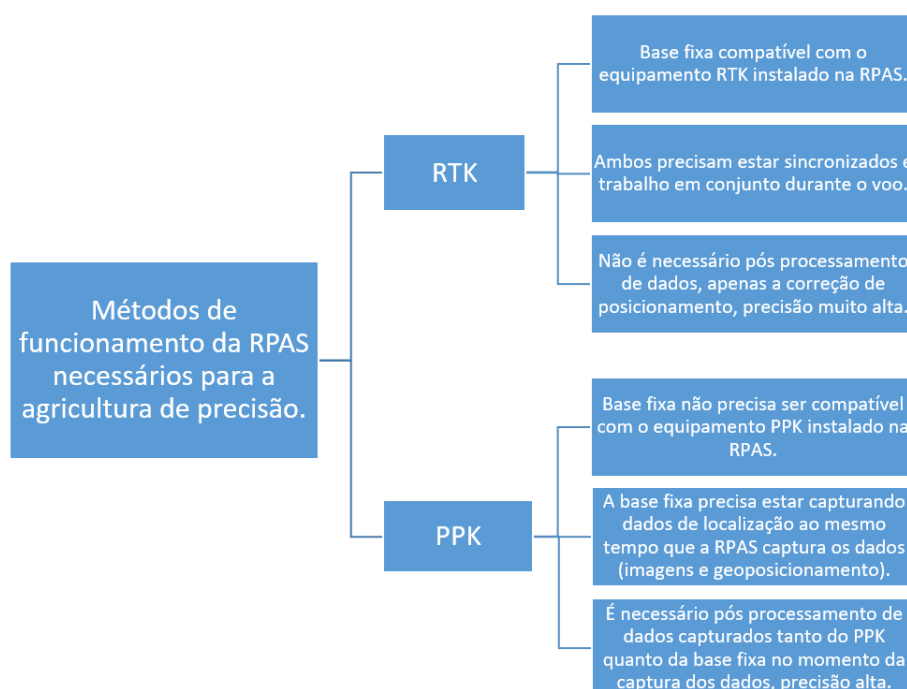
A diferença da restituição da imagem entre a Fotogrametria Digital e a Analítica é que a Digital faz a leitura da imagem numérica e a tecnologia analítica é por meio de filmes, que são revelados em imagens fotográficas. Segundo ROSALEN (1997) um restituidor digital, deve realizar as seguintes operações: aquisição digital de imagens; tratamento digital de imagens (correções radiométricas e geométricas, por exemplo) e restituição digital (correlação de imagens e reconhecimento de padrões).

A partir de 1980, iniciaram-se alguns projetos de RPAS no Brasil, mas, segundo Medeiros (2008), foi na década de 90, do século passado, que ocorreu um maior desenvolvimento desta tecnologia no Brasil. Destaca-se que a utilização de RPAS está se

firmando como uma importante opção na agricultura de precisão, visto que essa tecnologia apresenta, principalmente, grande versatilidade na realização de mapeamentos em larga escala. Segundo Johnson (2003), o RPAS é usado para monitoramento de diferentes fatores como na identificação de pragas ou ainda deficiências nutricionais. Também podem ser utilizados no monitoramento de desmatamentos, sistemas florestais, assim como no mapeamento do solo, além de auxiliar no uso e aplicação de agroquímicos e no mapeamento da rede de drenagem.

A preferência pelo uso de RPAS para a cobertura aerofotogramétrica, na agricultura de precisão, deve-se principalmente à boa resolução das imagens obtidas e por não sofrerem obstrução por nuvens. Além disso, o método oferece maior liberdade ao usuário, uma vez que as imagens podem ser obtidas no momento em que se fazem necessárias. Conforme BIAGIONI (2010), o uso de RPAS no Brasil na agricultura de precisão data do final dos anos 90 e início dos 2000 e vem auxiliando o agricultor com novos conhecimentos e estratégias de manejos eficientes no gerenciamento da agricultura e monitoramento das atividades, maximizando a rentabilidade das colheitas e tornando o agronegócio mais competitivo. Abaixo, temos o Ornanograma 1, onde podemos observar como funciona uma RPAS para agricultura de precisão utilizando o RTK (*Real Time Kinematic*) e o PPK (*Post processed Kinematic*).

Ornanograma 1. Como funciona cada tipo de tecnologia GNSS para a agricultura de precisão de uma RPAS utilizada em campo, além da RPAS é necessário uma base fixa, de preferência, compatível com todo os equipamentos presentes.



2.3.1 Sistema de Aeronave Remotamente Pilotada

De acordo com a Organização da Aviação Civil Internacional (OACI) os “drones” são denominados RPAS (Remotely Piloted Aircraft Systems, ou em português, Sistema de Aeronaves Remotamente Pilotadas) (DECEA, 2019). Sendo importante destacar que tecnologias presentes em RPAS não são recentes, entretanto, nos últimos anos ocorreu a sua popularização.

As tecnologias presentes nos RPAS vêm de muitos anos atrás, sendo os primeiros relatos do século passado, onde a Áustria atacou a cidade de Veneza na Itália, usando balões carregados com explosivos. Esses balões eram lançados de navios e através de um fio de cobre acionavam a ignição dos explosivos, quando estes estivessem sobre o alvo. Desde então os RPAS evoluíram principalmente para fins militares passando de tecnologias analógicas a digitais, como a conhecemos atualmente (FERNANDO & ZAGO, 2020).

A popularização e crescente vendas para uso civil, de RPAS ganharam espaço notável para a ocupação do espaço aéreo. Atualmente, segundo dados do Sisant em 2022, estão cadastrados 107.471 RPAS, sendo que deste total, um pouco mais de 58.000 são de uso recreativo, porém, estima-se que os números não oficiais sejam mais do que o dobro.

Dentre os componentes que foram desenvolvidos durante as primeira e segunda guerras, assim como na época da guerra fria, podemos destacar a criação do sistema de rádio controle, motores a combustão e elétricos, sistema de giroscópios eletrônicos, piloto automático, Sistema de Posicionamento Global (GPS), acelerômetros, entre outros, em paralelo, avanços em tecnologia computacional, sistemas globais de navegação e materiais mais leves para construção das RPAS são os maiores responsáveis pelo desenvolvimento destes (DECEA, 2022).

Atualmente essa tecnologia está disponível para uso civil, tendo diversas aplicações entre as quais, podemos destacar: fiscalização ambiental, agricultura de precisão, monitoramento de extração de minério, ocupação de áreas urbanas, monitoramento de área de risco, entrega de mercadorias, transporte de pessoas entre outros.

Diversas empresas surgiram no mercado e sendo a empresa da sigla DJI (Dà-Jiāng Innovations Science and Technology) a atual líder do setor, responsável por aproximadamente 70% do mercado de RPAS para uso recreativo e industrial, com aeronaves de pequeno porte (abaixo de 25 kg de peso máximo de voo) (ANWAR, 2023).

De um modo geral, quando se fala de componentes estruturais e eletrônicos, deve-se ter a mente que existem dois moldes de compras dos RPAS, sendo: RTF (*Ready to Fly*) e os

customizados. Os RTF, como o próprio nome traduz, são RPAS que saem de fábrica pronto para o voo, o que dificulta adaptações e modificações de componentes, uma vez que, quase todo o sistema está fechado para os itens que o compõem. Por outro lado, os RPAS customizados ou de produção caseira, possuem os componentes e os sistemas eletrônicos separados, o que permite adaptar e adequar acessórios com mais facilidade, entretanto o operador deve ter conhecimento pleno, para montar e configurar este tipo de RPAS, devido à complexidade na escolha dos componentes estruturais, eletrônicos e a configuração da controladora de voo.

2.3.2 Índices vegetativos a partir de câmeras multiespectrais

Cada objeto possui um comportamento espectral específico que pode ser definido como um conjunto de valores sucessivos da reflectância ao longo do espectro, ou seja, é a assinatura espectral do objeto eletromagnético, sendo esta que define as feições deste, no qual a forma, a intensidade e a localização de cada banda de absorção é o que caracteriza o objeto, este conhecimento do comportamento espectral é de suma importância para a escolha do espectro sobre qual pretende adquirir os dados para uma aplicação específica (AGENCIA ESPACIAL BRASILEIRA, 2008).

De acordo com DE MORAES (2002), uma vegetação considerada sadia irá apresentar uma alta absorção de energia eletromagnética, na região denominada do espectro visível, esta é capturada pela clorofila para a realização da fotossíntese, dentro do espectro a absorção é mais fraca na região que caracteriza a coloração da vegetação, devido a estrutura celular ocorre uma alta reflectância no infravermelho próximo (até 1,3 μm), no qual é a partir deste comprimento de onda mostra que existe água na vegetação modulando assim as bandas de absorção no comportamento espectral presente. Segundo BARBOSA (2006) tais índices são modelos matemáticos que foram desenvolvidos para a avaliação de cobertura vegetal que relacionam os parâmetros que podem ser mensuráveis a campo, tanto quantitativamente como qualitativamente.

MARCUSSI et. al. (2010), demonstra que as análises da vegetação e detecção de mudanças nas mesmas tem o intuito de fazer uma avaliação dos recursos naturais e ao mesmo tempo monitorar a cobertura vegetal, com isto a detecção qualitativa da vegetação acaba se tornando uma das principais aplicações do SR na área de gerenciamento ambiental, para auxiliar nesse estudo são utilizados índices de vegetação (IV). Os parâmetros biofísicos da vegetação veem sendo modelados por cientistas desde a década de 1960 com o uso de dados de SR, no qual foi envolvido o uso de IV, que podem ser definidos por medidas radiométricas

adimensionais que indicam a abundância relativa e atividade da vegetação sadia, com a inclusão do Índice de Área Foliar (IAF), teor de clorofila, porcentagem de cobertura verde, radiação fotossintética ativa absorvida (em inglês é utilizado as siglas RFAA OU APAR) e biomassa verde (JENSEN, 2009).

PONZONI (2001) mostra que o resultado da cobertura vegetal é um processo que envolve parâmetros e fatores ambientais, sendo determinado de um produto de SR, sendo medido por sensores remotamente situados, que acabam incluindo interferências de vários fatores como o espalhamento atmosférico, as características das folhas como a do dossel, fonte de radiação, teor de umidade do solo, sobre o que ocorrem interferência da reflectância do solo, entre outros fatores que podem estar presente, por conta disso deve se levar em conta estes fatores, sendo as características intrínsecas.

No Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) (figura 11) EASTMAN (1998), cita que o Índice Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI) foi proposto por ROUSE et al. (1974), no qual foi introduzido para realizar um IV sendo que auxilia na separação da vegetação do solo de fundo. Segundo MENESES (2012), NDVI envolve a diferença e a soma entre estas duas bandas do infravermelho próximo e do vermelho, de acordo com a Equação 1:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red}$$

Onde:

NDVI = Índice de vegetação da diferença normalizada;

NIR = Valor médio da banda do infravermelho próximo;

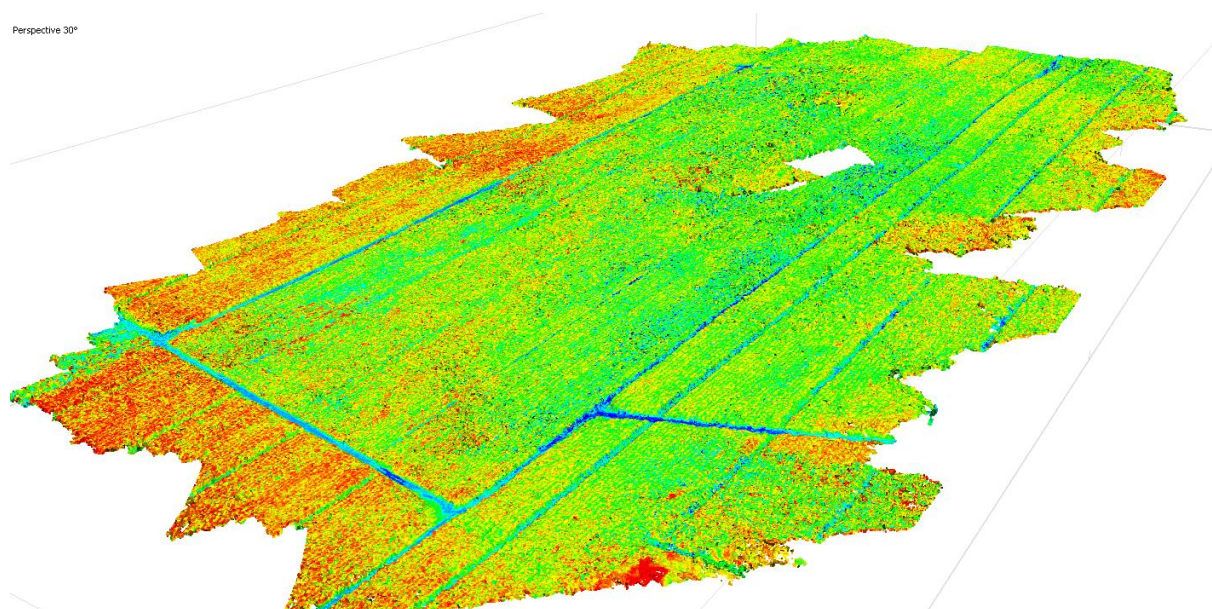
Red = Valor médio da banda do vermelho.

O NDVI se torna importante devido as mudanças sazonais e interanuais no desenvolvimento de determinada espécie ou vegetação, podem ser monitoradas minuciosamente, esta equação produz valores de índices que variam de -1,0 a 1,0, sendo que estes valores positivos crescentes indicam aumento de vegetação verde e os valores negativos indicam superfícies sem vegetação, ou seja, em uma floresta sadia os valores estarão positivos e próximos de 1,0 (figura 4 e 5) (JENSEN, 2009).

De acordo com DE MORAES (2002), é o IV mais apropriado quando o trabalho exige uma comparação ao longo do tempo de uma única área, com este índice se espera obter menor influência pelas variações das condições atmosféricas, pode-se realizar trabalhos com diversos aspectos da vegetação como: estimativa a radiação fotossintética ativa, que são utilizados para

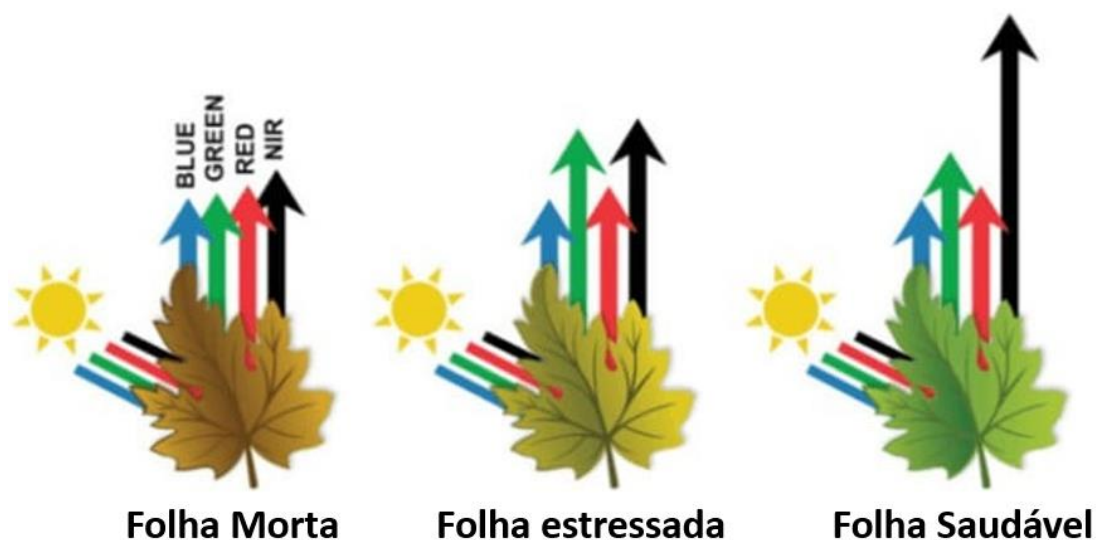
estudo de fotossíntese e sequestro de carbono, determinação de porcentagem de cobertura de solo, medidas de área foliar, etc

Figura 4. NDVI aplicado a uma nuvem de pontos durante o processamento de imagens dentro do Agisoft Metashape.



Fonte: Autor (2023).

Figura 5. Índice de refletância entre uma folha morta, estressada e saudável, quanto mais próximo do ideal da sanidade da planta, maior será o valor do NDVI.



Fonte imagem: <https://blog.aegro.com.br/indice-de-vegetacao/> (2023).

Outro índice advindo de imagens multiespectrais é o NDWI (Índice de Água por Diferença Normalizada), que é baseado na diferença normalizada entre as bandas espectrais

verde (*green*) e infravermelha próxima (NIR) das imagens de satélite. O NDWI é um índice que fornece informações importantes sobre a quantidade de água presente nas plantas e no solo, permitindo a detecção de áreas com maior ou menor umidade. Ele é particularmente útil em áreas com alta umidade, como florestas, áreas pantanosas e áreas irrigadas, onde a presença de água é um fator determinante para o desenvolvimento da vegetação.

Um estudo realizado por Zhang et al. em 2019 utilizou o NDWI para monitorar a umidade do solo e a produtividade agrícola em uma área de plantação de milho na China. Os resultados mostraram que o NDWI foi capaz de detectar variações na umidade do solo e na produtividade do milho, permitindo uma avaliação precisa do estado da cultura e uma tomada de decisão mais eficiente em relação ao manejo da cultura, de acordo com a Equação 2:

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

Onde:

NDWI = Índice de Água por Diferença Normalizada;

NIR = Valor médio da banda do infravermelho próximo;

Green = Valor médio da banda do verde.

No Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI), se assemelha ao NDVI, mas suprime os efeitos dos pixels do solo. Ele usa um fator de ajuste de fundo do dossel, *L*, que é uma função da densidade da vegetação e geralmente requer conhecimento prévio da quantidade de vegetação. HUETE (1988) sugere um valor ótimo de *L* = 0,5 para levar em conta as variações de fundo do solo de primeira ordem. Este índice é melhor usado em áreas com vegetação relativamente esparsa onde o solo é visível através do dossel. Já uma melhoria deste índice, o Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Otimizado (OSAVI) é baseado no Índice de Vegetação Ajustado ao Solo (SAVI). Ele usa um valor padrão de 0,16 para o fator de ajuste do fundo da copa. RONDEAUX (1996) determinou que esse valor fornece maior variação do solo do que o SAVI para cobertura vegetal baixa, ao mesmo tempo em que demonstra maior sensibilidade à cobertura vegetal superior a 50%. Este índice é melhor usado em áreas com vegetação relativamente esparsa onde o solo é visível através do dossel. (Equação 3 e 4):

$$SAVI = \frac{(L + 0.5) * (NIR - Red)}{(NIR + Red + 0.5)}$$

$$OSAVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red + 0.16)}$$

SAVI = Índice de Vegetação Ajustado ao Solo;

OSAVI = Índice de Vegetação Ajustado ao Solo Otimizado;

NIR = Valor médio da banda do infravermelho próximo;

Red = Valor médio da banda do vermelho;

L = Variação de fundo de solo, quanto mais solo mais próximo de 0, quanto mais vegetação, mais próximo de 1. Para este caso, foi utilizado o valor 0,25. Quando existe muita vegetação e pouco solo nú.

De acordo com CHEN et al. (2019), o OSAVI é uma medida robusta para estimar a produtividade das culturas em diferentes condições de crescimento, e tem sido amplamente utilizado em estudos de monitoramento de vegetação e de produtividade agrícola. Já no Índice de Vegetação de Diferença Normalizada Verde (GNDVI), sendo semelhante ao NDVI, exceto pelo fato de medir o espectro verde de 540 a 570 nm em vez do espectro vermelho. Este índice é mais sensível à concentração de clorofila do que o NDVI. (Equação 5):

$$GNDVI = \frac{(NIR - Green)}{(NIR + Green)}$$

GNDVI = Índice de Vegetação por Diferença Normalizada;

NIR = Valor médio da banda do infravermelho próximo;

Green = Valor médio da banda do verde.

No Índice de Reflectância Fotoquímico - PRI (Photosynthetic Reflectance Index) foi desenvolvido para avaliar a eficiência fotossintética usando as bandas de reflectância nos comprimentos de onda do azul e do verde (GAMON et al., 1992). O PRI (Equação 4) é sensível às alterações nos pigmentos de carotenoides (principalmente a xantofila) na folhagem. Tais pigmentos são indicativos da eficiência do uso da luz fotossintética ou da taxa de dióxido de carbono armazenada pela folhagem por unidade de energia absorvida. Esse índice é usado em estudos de estresse e de produtividade da vegetação. Os valores variam entre -1 e 1 e valores comuns para vegetação sadia ficam entre -0,2 e 0,2 (GAMON et al., 1992). (Equação 6):

$$PRI = \frac{(Blue - Green)}{(Blue + Green)}$$

O PRI expressa a relação entre as bandas do verde e azul e, segundo Rahman et al. (2000), pode ser relacionado com a eficiência do uso da luz no processo fotossintético. Salienta-se, porém, que os dados de PRI devem ser reescalados para valores positivos, gerando um novo índice, o sPRI (Equação 6). Assim, o sequestro florestal de carbono depende da integração desses dois índices (NDVI e sPRI), que geram um novo índice: o CO₂flux (BAPTISTA, 2003; BAPTISTA, 2004).

Após a realização do cálculo do índice PRI, deve ser calculado o índice sPRI, seguindo a metodologia proposta por RAHMAN et al. (2000). O índice sPRI possui o mesmo significado do PRI, mas passa a ser representado em uma escala que varia entre 0 e 1 para, assim, ficar com a mesma escala do NDVI. Os índices NDVI e PRI foram combinados, segundo a metodologia de Rahman et al. (2000), para gerar o índice CO₂ Flux, que é a integração do índice de reflectância fotoquímica, ou PRI, que representa a eficiência do uso da luz na fotossíntese, com o NDVI (RAHMAN et al., 2000), que representa o vigor da vegetação fotossinteticamente ativa, o que tornaria possível integrar as feições de absorção decorrentes do sequestro de carbono. A esse índice integrado, Baptista (2003) chamou de CO₂ Flux. (Equação 7 e 8):

$$sPRI = \frac{(PRI + 1)}{2} \qquad CO_2flux = NDVI \times sPRI$$

Para determinação do fluxo de CO₂, Equação 7, estudos recentes salientam a possibilidade da utilização da integração do índice espectral NDVI e do PRI. O índice espectral PRI pode ser correlacionado com as taxas de fotossíntese e o NDVI com o sequestro de carbono. Essa integração mede a eficiência do processo de sequestro de carbono. Há diferenças no estoque de carbono presente nos diferentes biomas e nos diferentes locais dentro dos biomas. De acordo com RIBEIRO (2007), uma floresta jovem estoca menos carbono se comparada com uma floresta madura, porém, quando se considera o sequestro de carbono da atmosfera ao longo do tempo, a floresta jovem se sobressai NDVI e do PRI (RAHMAN et al 2000). Esta integração pode ser medida pelo índice CO₂ Flux, que resulta da razão entre aqueles dois índices. O índice NDVI expressa a diferença de reflectância entre a feição de absorção do vermelho (660 nm) e o aumento de albedo que ocorre nos espectros de vegetação após o início do infravermelho

próximo (800 nm) e o PRI expressa a diferença entre a feição de absorção no azul (531nm) e o pico de reflectância do verde (570 nm).

O PRI e o NDVI podem ser correlacionados com as taxas de fotossíntese e o CO₂ Flux com o sequestro de carbono. Isso é explicado pelo fato de que, quanto maior for a atividade fotossintética, maiores serão as feições de absorção nas faixas do azul e do vermelho e mais expressivos serão os valores (BAPTISTA, 2004). Logo, quanto maior for a diferença de contraste entre a região do visível e o infravermelho próximo, maior será a biomassa da vegetação na área imageada, (MOREIRA, 2001) e maior o potencial de fixação de carbono.

A borda vermelha tem sido usada para estimar o teor de clorofila não apenas das folhas (FILELLA & PEÑUELAS, 1994; PINAR & CURRAN, 1996), mas também na superfície das águas de um reservatório (SCHALLES, GITELSON, YACOBI, & KROENKE, 1998). Esses trabalhos levaram à formulação de um novo índice de vegetação relacionado à reflectância da borda vermelha, a borda vermelha da diferença normalizada (NDRE), que se demonstrou ser mais vantajosa do que o NDVI para otimizar os tempos de colheita com base nas transições da atividade fotossintética (MACCIONI, AGATI & MAZZINGHI, 2001). O NDRE (*normalized difference red edge*) é um índice espectral que é construído a partir da substituição do vermelho, pela borda vermelha no NDVI, o índice é muito semelhante ao mais comum e poderoso, NDVI. Contudo, o NDRE é mais sensível do que o NDVI para um certo período de maturação da safra. O NDRE é um melhor marcador das condições das plantas do que o NDVI para as colheitas de estação média e tardia que já acumularam uma grande quantidade de clorofila (MACCIONI, AGATI & MAZZINGHI, 2001). A razão é que a luz vermelha limítrofe (a utilizada no NDRE) pode passar através das folhas muito mais profunda do que a luz vermelha (a utilizada no NDVI). É mais relevante do que o IDVN para uso intensivo durante toda a época de cultivo, pois o IDVN torna-se frequentemente impreciso depois que as plantas acumularem uma quantidade máxima de clorofila. O NDRE pode ser utilizado como um único ponto de observação, assim como em combinação com o IDVN durante todo o período de envelhecimento da cobertura vegetal, desde a data de sementeira até à colheita. (equação 9).

$$NDRE = \frac{(NIR - RE)}{(NIR + RE)}$$

NDRE = Índice de Diferença Normalizada da Borda do Vermelho.

RE = Valor médio da banda da borda do vermelho.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Quanto das aeronaves utilizadas

Para este aerolevantamento na área industrial de cana-de-açúcar de pertencentes ao Grupo Luiz Jatobá, foi utilizado uma RPAS *Ebee Plus RTK/PPK* versão 2018, com autonomia de voo de aproximadamente 58 minutos, disponibilizada pela CODEVASF, o segundo equipamento utilizado foi uma RPAS *Phantom 4 Standard*.

3.1.1 eBee Plus RTK/PPK e câmera Parrot Sequoia

A RPAS *eBee Plus RTK/PPK* é uma RPAS de asa fixa projetado para mapeamento aéreo de alta precisão, possui um conjunto avançado de recursos e especificações técnicas que o tornam um dos drones asa fixa mais popular para mapeamento aéreo em todo o mundo. Uma das principais características quanto em seu lançamento foi a sua autonomia de voo. O drone pode voar por até 59 minutos, permitindo que os usuários cubram áreas de até 40 km² com um único voo. O *eBee Plus RTK/PPK* também é capaz de voar a altitudes de até 1.500 metros acima do nível do mar, o que o torna ideal para aplicações de mapeamento em áreas montanhosas (figura 6).

Além disso, o *eBee Plus RTK/PPK* é equipado com um conjunto de sensores avançados que garantem a precisão dos dados coletados. O drone vem equipado com um sensor de posição RTK/PPK que fornece informações precisas sobre a posição e a altitude do drone. Isso permite que as imagens coletadas sejam georreferenciadas com precisão, aumentando assim, a precisão das medições de altura e posicionamento terrestre (XYZ).

O *eBee Plus RTK/PPK* também possui uma câmera RGB integrada que pode capturar imagens com resolução de até 20 megapixels sensefly S.O.D.A. e câmera opcional *Parrot Sequoia* multiespectral. Essa alta resolução permite a criação de modelos 3D detalhados e a detecção de objetos em alta resolução e as imagens multiespectrais, podem ser usadas para análise de vegetação, identificando áreas de estresse e determinando a saúde das plantas. Em conjunto, a RPAS é equipada com um sistema de voo autônomo que permite que ele seja operado com facilidade, com o *software* de planejamento de voo *eMotion*, os usuários podem criar rotas de voo personalizadas para coletar dados em áreas específicas. O drone então voa

automaticamente ao longo da rota, capturando imagens e coletando dados precisos ao longo do caminho.

Além disso, o *eBee Plus RTK/PPK* é equipado com uma série de recursos de segurança que garantem a operação segura da RPAS, possuindo um sistema de redundância que garante a continuidade do voo em caso de falha do motor e, também é equipado com um paraquedas de segurança que é acionado automaticamente em caso de emergência. Em termos de especificações de voo, sendo capaz de voar a uma velocidade de até 110 km/h e pode ser operado a temperaturas que variam de -20°C a 50°C. O drone é relativamente leve, pesando apenas 1,7 kg, o que o torna fácil de transportar e operar.

A câmera multispectral *Parrot Sequoia* é um acessório para ser utilizada em conjunto com a aeronave *eBee*, especialmente em aplicações de agricultura de precisão. Esta câmera é capaz de capturar imagens em quatro bandas espectrais diferentes: verde, vermelho, borda do vermelho e infravermelho próximo. Com a utilização da câmera, é possível coletar informações importantes sobre as plantas, como a quantidade de clorofila, níveis de estresse e saúde em geral. A *Parrot Sequoia* é uma câmera compacta e leve, projetada para ser facilmente acoplada à *eBee*. Ela é capaz de capturar a intensidade solar através de seu sensor de luz solar que ajusta automaticamente as configurações da câmera para garantir que as imagens sejam capturadas com precisão, independentemente das condições de luz ambiente. A câmera *Parrot Sequoia* ainda é capaz de capturar imagens em modo RGB (Red, Green, Blue) em resolução de 20.4mpx e em modo multispectral ao mesmo tempo. (SENSEFLY, 2019).

Figura 6. *eBee Plus RTK/PPK* versão 2018, na visão frontal superior.



FONTE: Sensefly, 2019.

3.1.2 Drone Phantom 4 Standard

O *Phantom 4 Standard* é uma RPAS popular da DJI, projetado para capturar imagens aéreas de alta qualidade e ser fácil de operar. Ele foi lançado em março de 2016 e é uma opção acessível para aqueles que desejam experimentar a fotografia e videografia aérea.

A RPAS possui um sistema de câmera avançado que permite a captura de imagens de alta qualidade em 4K a 30 quadros por segundo e fotografias de 12 megapixels. Além disso, o *Phantom 4 Standard* também possui a capacidade de capturar imagens em HDR (*High Dynamic Range*) para um melhor equilíbrio de luz e sombra. A câmera do *Phantom 4* é montada em um *gimbal* estabilizado de três eixos, o que ajuda a manter as imagens estáveis e suaves durante o voo. O *gimbal* é capaz de inclinar para cima e para baixo em um ângulo de até 35 graus, o que permite a captura de imagens aéreas em ângulos diferentes.

O *Phantom 4 Standard* possui um sistema de voo inteligente, o que o torna fácil de voar para iniciantes e também oferece uma ampla gama de recursos avançados para usuários mais experientes. Um dos recursos mais notáveis do *Phantom 4* em categorias *Advanced e Professional*, é o seu sistema de detecção de obstáculos na parte inferior do drone para detectar obstáculos e evitar colisões durante o voo além de auxiliá-lo nos pousos. Além disso, o aparelho tem uma capacidade de voo máximo de 28 minutos e pode voar a uma velocidade máxima de 45 mph (72,4 km/h) em modo esportivo. Ele também é capaz de voar a uma altitude máxima de 3.000 metros acima do nível do mar, o que o torna adequado para a maioria das aplicações de fotografia e videografia aérea (DJI, 2019).

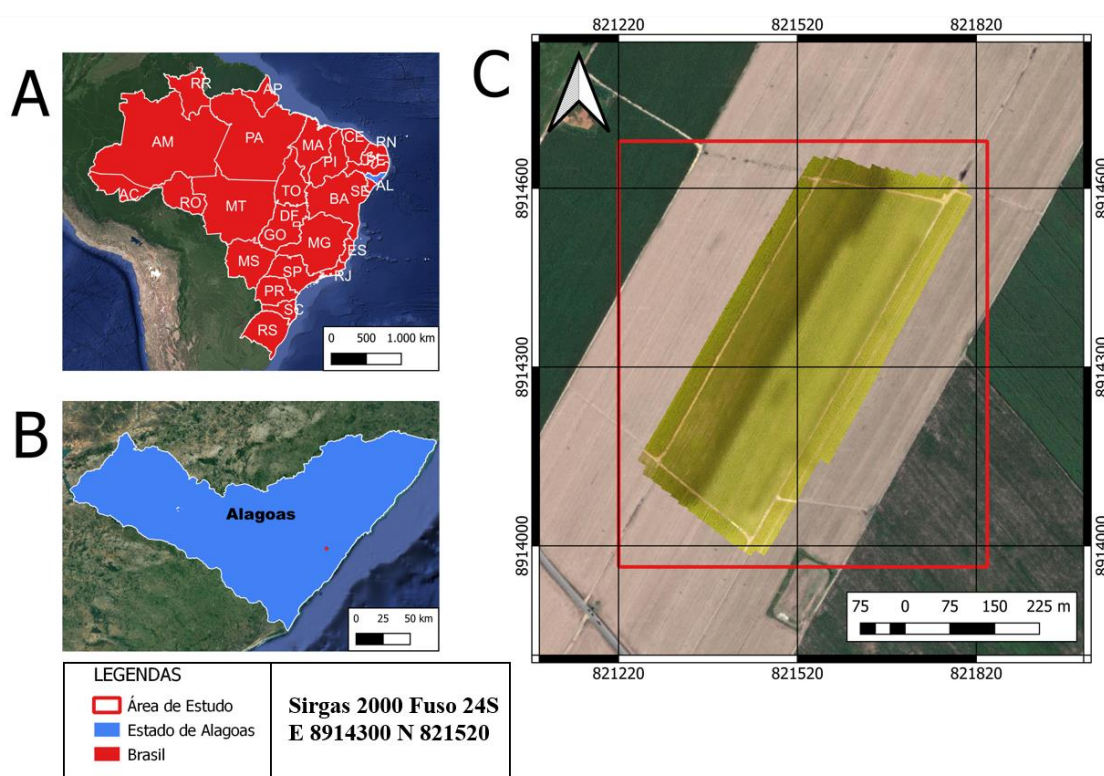
A RPAS é controlada por um controle remoto com alcance máximo de até 5 km, permitindo que os usuários controlem o drone a uma distância segura, porém, para as leis vigentes no Brasil atualmente, do Regulamento Brasileiro de Aviação Civil, RBAC-E Nº 94 e emendas, não é permitido voos BVLOS ou *Beyond Visual Line of Sight* (além da linha de visada da RPAS), em inglês para este equipamento. O controle remoto possui um design ergonômico e intuitivo, com *joysticks* para controlar o movimento do drone e uma série de botões para acessar os recursos do aparelho.

3.2 Quanto aos locais da aquisição de imagens

As imagens foram obtidas em áreas de plantação industrial de cana-de-açúcar na Fazenda Nova, em Miguel dos Campos – AL, (Nas coordenadas em UTM / Sirgas 2000 24S em eixo E 8914300 e eixo N 821520, a uma altitude de aproximadamente 107m), o clima da

região, pela classificação climática de Köppen, é “As”, ou seja, tropical chuvoso, com verão seco e inverno chuvoso (Cruz et al., 2008) com temperatura média anual de 25,3° C e precipitação de 1441mm. O solo do local é classificado como Latossolo Amarelo Distrocoeso Argissólico, de textura média/argilosa e declividade inferior a 3% (ALMEIDA et al., 2008), compreendendo a uma área de aproximadamente 24 hectares, de um talhão de cana-de-açúcar desta localidade (figura 7).

Figura 7. Local de aquisição das imagens, (A) da imagem geral do Brasil, (B) para o estado de Alagoas, (C) ao município de São Miguel dos Campos na marcação final do talhão aonde foi realizado o estudo.



FONTE: Autor (2023).

3.3 Do início dos trabalhos para a obtenções das imagens até o campo

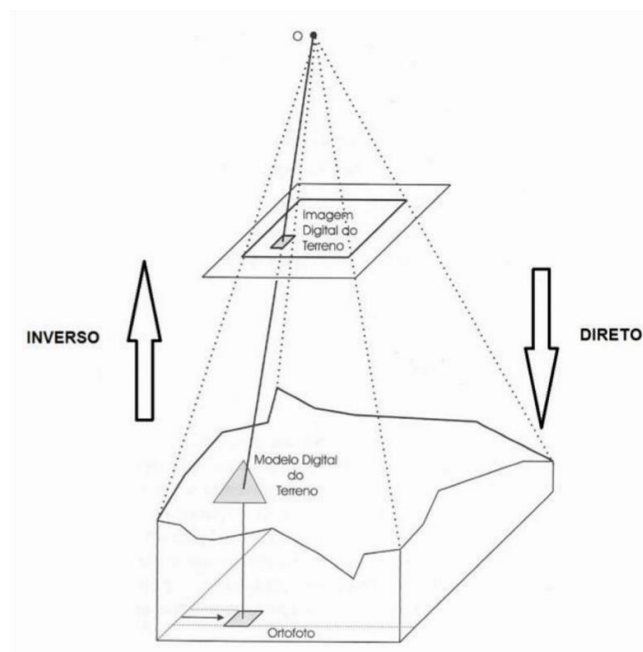
As ortofotos podem ser obtidas através de dois métodos: direto e inverso. O método direto consiste, inicialmente, em projetar os pixels da imagem de entrada para a ortofoto digital aplicando-se as correções de erros sistemáticos através da equação de colinearidade inversa, gerando uma malha irregular no referencial da ortofoto digital (ARRUDA JR, 2002).

Segundo Almeida (1989), identifica-se três etapas no método direto, a saber: transformação da referencial imagem digital para o referencial fotogramétrico; transformação

do referencial fotogramétrico para o referencial da ortofoto digital; e reamostragem da malha da ortofoto digital.

O método indireto realiza, em relação ao método direto, um processo inverso para transferência dos tons de cinza da imagem de entrada para a ortofoto digital. A segunda etapa deste método corresponde à primeira etapa do método direto, só que agora é realizado no sentido “inverso” permitindo a transformação dos pixels projetados do referencial fotográfico para o referencial da imagem digital. A terceira etapa deste método consiste na reamostragem dos pixels da ortofoto digital (ARRUDA JR, 2002) (Figura 8). Sendo escolhida a forma direta na obtenção das imagens.

Figura 8. Método direto e inverso da geração de ortofoto.



FONTE: Palermo e Leite (2013).

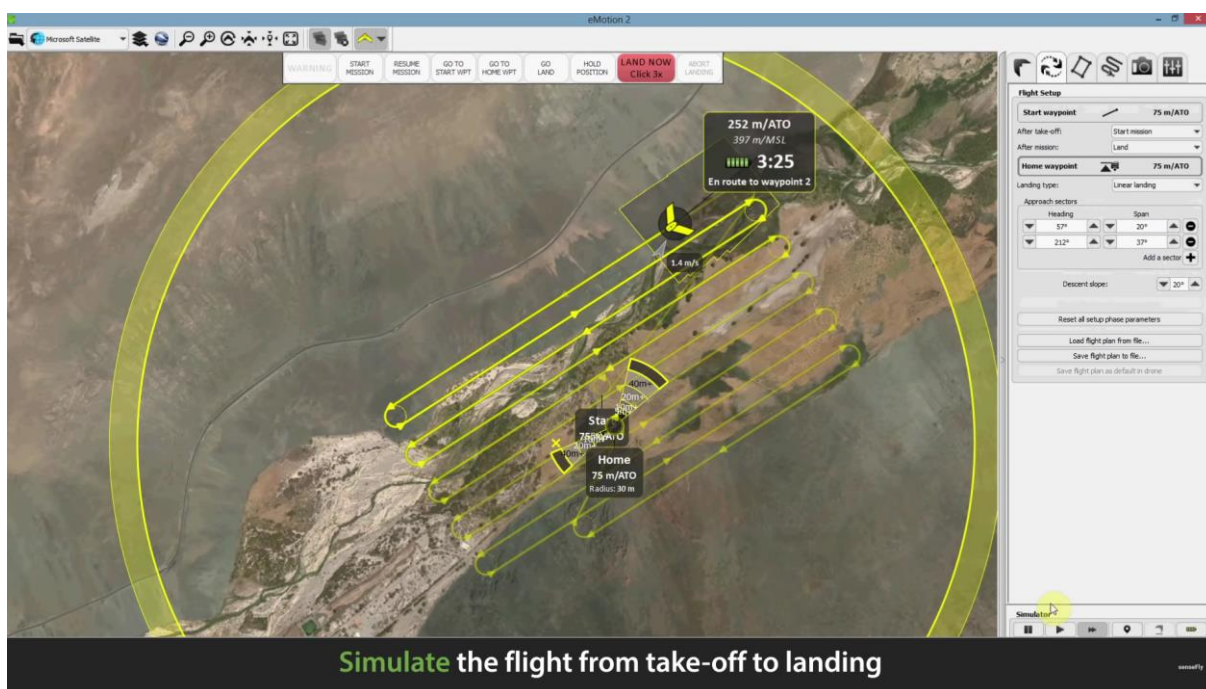
3.3.1 Software eMotion da SenseFly para o eBee

O *software eMotion* (figura 9) é um sistema de controle de voo desenvolvido pela *SenseFly* para uso em sua linha de RPAS *eBee*. O software oferece aos operadores de drones um conjunto de recursos para planejamento de voo, controle de voo e pós-processamento de dados, além de sua facilidade de uso, o *software* é projetado para permitir que usuários sem experiência prévia em pilotagem de drones possam operar o *eBee* com segurança e eficiência.

O sistema de controle de voo é intuitivo e permite que os usuários personalizem a altitude, velocidade e trajetória de voo com apenas alguns cliques, oferece recursos de segurança avançados, incluindo um sistema de recuperação de emergência que permite que o drone retorne automaticamente ao ponto de partida em caso de perda de sinal ou outros problemas de comunicação.

O *software* também inclui um sistema de controle de tráfego aéreo que ajuda os usuários a evitar colisões com outras aeronaves e aeronaves tripuladas. Além disso, também oferece recursos de pós-processamento de dados para análise de imagens aéreas e geração de mapas e modelos 3D. Os usuários podem facilmente carregar dados coletados pelo drone em um computador e usar o *software* para criar imagens de alta resolução, modelos 3D precisos e mapas georreferenciados.

Figura 9. Software para Windows da eMotion Sensefly para aeronaves eBee.



Fonte: <https://my.sensefly.com/> (2023).

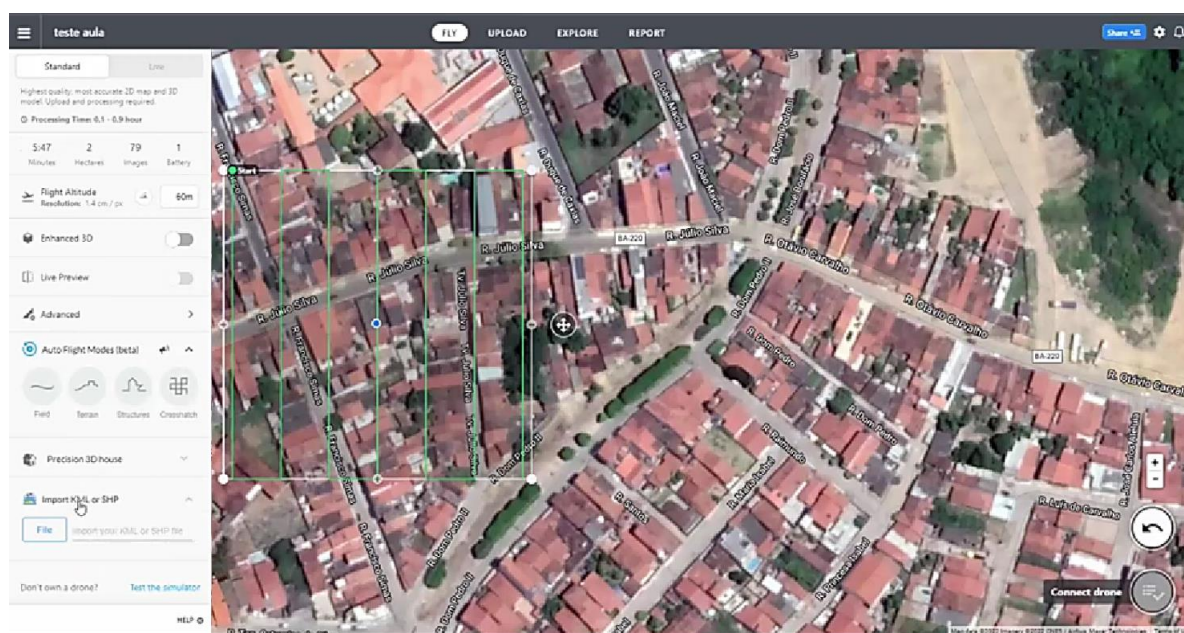
O software também é compatível com outros programas de análise de dados, como o *Pix4Dmapper* e *Agisoft Metashape*, permitindo que os usuários gerem relatórios precisos e completos para uma variedade de aplicações.

3.3.2 Aplicativo Drone Deploy

O *Drone Deploy* (figura 10) é um aplicativo de mapeamento aéreo para *iOS* e *Android*, e permite que usuários coletem imagens de alta qualidade do solo a partir de drones e transformem essas imagens em mapas interativos e modelos 3D precisos, com suporte a uma ampla variedade de drones, incluindo modelos da DJI, 3DR e Yuneec.

Para começar a coletar imagens, os usuários precisam planejar uma missão de voo no aplicativo, definindo a área a ser mapeada, a altitude de voo, a sobreposição de imagem e outros parâmetros. Da mesma forma que o *eMotion*, este aplicativo também permite que os usuários monitorem o progresso do voo em tempo real, porém, apenas permite que seja realizado ajustes na missão conforme necessário anterior ao voo em si.

Figura 10. Captura de tela do próprio aplicativo Drone Deploy no momento de criação de uma missão teste para voo.



FONTE: Autor (2020).

Em termos de especificações técnicas, o *Drone Deploy* é um aplicativo bastante robusto, capaz de lidar com grandes conjuntos de dados de imagem e processá-los de maneira eficiente. Ele suporta uma ampla variedade de formatos de imagem, incluindo JPEG, TIFF e RAW, e pode exportar dados em formatos comuns como *GeoTIFF* e OBJ. O aplicativo também é compatível com dispositivos *Android* e *iOS* e pode ser usado com vários modelos de drone (em sua versão paga).

3.3.3 Das condições climáticas e meteorológicas

Impreterivelmente foi necessário também saber com antecedência as condições climáticas locais, se o clima é chuvoso, nublado ou limpo (ausência de nuvens), assim como o índice de Kp. O índice Kp mede a perturbação geomagnética causada pela atividade solar, em uma escala de zero (sem atividade geomagnética) a nove (grande tempestade).

Quanto maior o índice Kp, maior a probabilidade de perda de sinal entre o controlador de voo e a RPAS, assim como perdas contínuas de sinal de GPS durante o voo, sendo que, qualquer tipo de equipamento que se utilize de GPS para navegação autônoma, este poderá perder o rumo, vindo a provocar um incidente, ou acidente. Kp's de um à quatro, são completamente seguros, sendo com um Kp de cinco, é provável que se tenha problemas de conexão com sinal de GPS em condições climáticas desfavoráveis acima de 35% de nebulosidade. À medida que o Kp sobe para seis, esta média sobe para mais de cinco por cento (+5%) em perda de sinal do GPS ou mesmo, sem conectividade a satélites de georeferenciamento e circunavegação. Já em sete, não será possível voar autonomamente como equipamentos de voo comum, e ainda assim, podemos ter interferência no IMU, uma vez que este também é sensível a ondas eletromagnéticas advindas de qualquer origem, seja ela de tempestades solares ou mesmo de fios elétricos e torres de alta tensão, como as utilizadas pelas concessionárias de transmissão de energia elétrica. Na figura 11, temos uma pequena representatividade relativa as condições meteorológicas e do índice K através do programa *UAV Forecast*.

A atividade solar interfere nos sinais de GPS de duas maneiras, ambas devido a interrupções na ionosfera. Diminui a relação sinal-ruído e afeta a frequência da portadora, fazendo com que o receptor perca o sinal travado em alguns satélites. Em vez de nove satélites, você pode ficar apenas com seis ou o número pode variar de segundo para segundo. Através do atraso de propagação do sinal através da ionosfera, tornando o posicionamento do GPS muito impreciso, mesmo que o receptor esteja com sinais de satélites com sinal travado. Sendo que a latitude onde o voo é realizado também pode ser afetado, principalmente quando este é realizado após as 16:00hs devido a diminuição contínua de satélites disponíveis para a conectividade de sinal.

Figura 11. Das várias capturas de tela do *tablet* utilizado no projeto, dentro do aplicativo *UAV Forecast*, em dias e épocas diferentes, com distancias variando entre 1.500 metros a 200 metros do local onde seria iniciado os trabalhos de tomada de fotos no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias de Alagoas – CECA / UFAL.

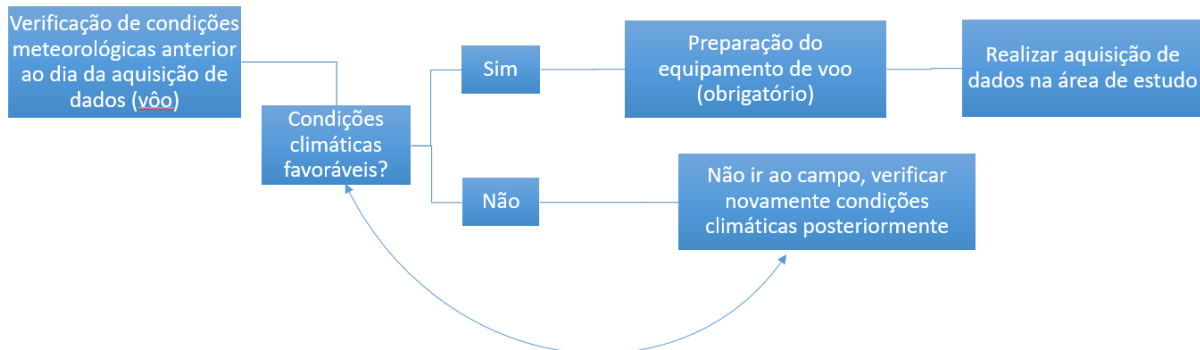


FONTE: Autor (2018).

3.3.4 Revisão Pré-voo

A revisão pré-voo consiste em uma *check list* dos equipamentos que vão ser utilizados antes, entre elas estão as baterias que serão utilizadas, cartão de memória esvaziado e extra caso necessários para armazenamento de imagens, configurações e checagem da câmera de bordo caso necessário, checagem visual do equipamento, manutenção mecânica e teste da aeronave antes do voo em duas etapas, uma no laboratório antes de ir a campo e uma segunda checagem antes da decolagem para verificar se todos os comandos de voo do RPAS estão em correto funcionamento, das condições climáticas adversas, seguindo as etapas demonstradas no Ornanograma 2, evitando imprevistos durante a tomada de imagens, porém, mesmo com a *check list* de pré voo, imprevistos ocorreram, como mal funcionamento do aplicativo *Drone Deploy*.

Organograma 2. Sequência de observações necessárias antes da ida ao campo para a captura de dados utilizando-se RPAS. As principais são condições meteorológicas, como chuvas e o índice Kp (tempestades solares).



FONTE: Autor (2023).

3.3.5 Para o plano de voo

Seguida da elaboração do plano de voo (missões) pelo *software Drone Deploy*, um dos principais programas utilizados pelos pilotos de RPAS para unidades da DJI e pre verificação através do mesmo software, este aplicativo funciona basicamente como interpretador de script que podem ser criados dentro do próprio aplicativo *Android*, quanto pela web do próprio criador do aplicativo, durante o voo, é possível observar a telemetria de posicionamento, direção, altura, velocidade, tempo de voo e da carga total da bateria automaticamente, além do feedback de vídeo durante a obtenção dos dados (imagens), tomados em até 120m de altitude por meio da RPAS, sendo que após cada voo, a bateria descarregada é substituída por uma carregada, recheagem de pré-voo em campo, e reiniciando a tomada de imagens.

No plano de voo, ao se utilizar os aplicativos de cada RPAS (figuras 15 e 16; Ornanograma 3), é preterível o conhecimento prévio da área de estudo em questão, dentre eles, fatores que influenciaram na escolha do local, primeiramente se a área é de fácil acesso, uma das questões muito discutidas atualmente refere-se ao VLOS (*Visual Lign-Of-Sign*), o chamado linha de visada, que está previsto dentro do conjunto de regras determinado pelo DECEA (Departamento de Espaço Aéreo), que consiste basicamente, do operador da unidade RPAS terá que ter sua operação em condições meteorológicas visuais (VMC).

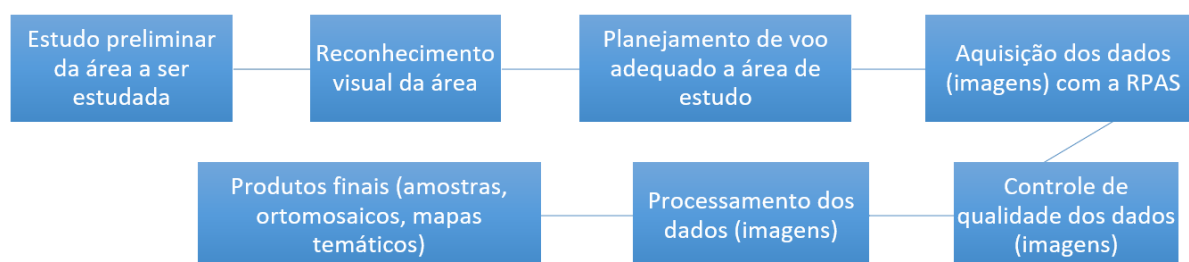
Nesse tipo de operação, o piloto, sem o auxílio de observadores de RPAS, mantém o contato visual direto, ou seja, sem o auxílio de lentes ou outros equipamentos, com a Aeronave Remotamente Pilotada, de modo a conduzir o voo com as responsabilidades de manter as

separações previstas com outras aeronaves, bem como de evitar colisões com aeronaves e obstáculos.

Devido a este procedimento de segurança, o piloto deverá estar praticamente no meio da área onde ocorrerá o voo, sem perder a aeronave de vista nem o sentido de voo da mesma. A certificação das condições meteorológicas e atmosféricas no dia da missão, sendo o principal fator tanto para a tomada de fotos quanto a execução da missão sem problemas, onde é preferível dia de sol e com mínimo de vento.

A região nordeste é conhecida por sua alta intensidade de ventos devido a sua localização equatorial e mudanças bruscas devido ao encontro de massas de ar oceânicas e continentais, que alteram fortemente tanto no vento e rajadas de vento, quanto na sua direção, transformando a condições mais favorável para os voos, em condições desfavoráveis.

Organograma 3. Sequência de medidas tomadas quanto ao voo e na aquisição de imagens.



FONTE: Autor (2023).

Ventos com intensidade superior a 30% da velocidade de deslocamento da aeronave, normalmente provocam desvios de trajetória, prejudicando o alinhamento sequencial das imagens (BRASIL, 2012). O programa de escolha e largamente utilizado na maioria dos trabalhos feitos com RPAS e VANTs que se utilizam de unidades de voo da DJI.

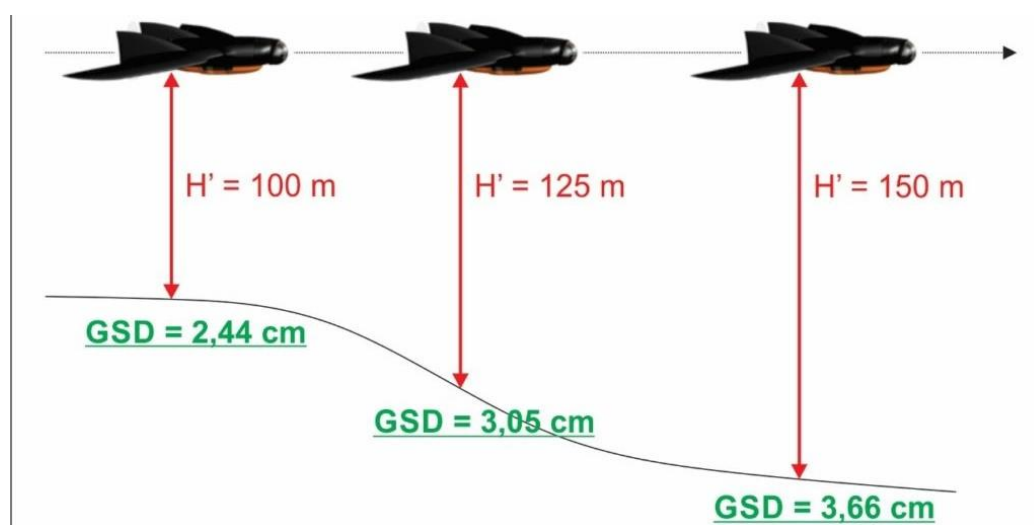
3.3.6 Das especificações técnicas da tomada de imagens e GSD

A escolha em relação do tamanho do pixel (GSD - *Ground Sample Distance*) ocorreu em função do produto final que se desejava avaliar, porem devido a determinados fatores, dentre eles, a velocidade mínima de voo da RPA asa fixa, que precisa voar em uma velocidade mínima de 8m/s para que se mantenha no ar, foi escolhido um GSD variando entre 3 e 6 cm da escolha do produto a ser avaliado, ou seja, em função da qualidade esperada para a ortofoto. Outro fator que influenciou além do GSD foi a área relativa que se desejava imagear, o efeito GSD em relação à altura média do voo é influencia proporcionalmente o GSD, quanto maior a altitude

de voo, uma área maior pode ser imageada, porem o GSD aumenta proporcionalmente em relação à altura, ou seja, quando dobramos a altitude de tomada de fotos, o GSD dobra de tamanho (Figura 12).

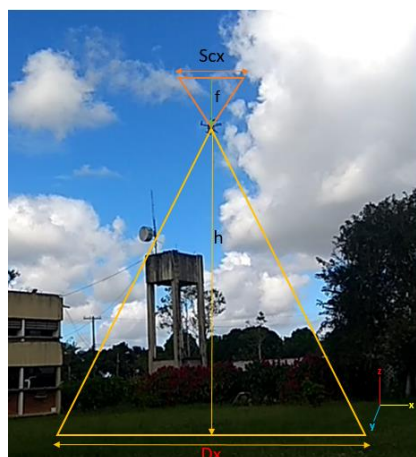
Para calcular o GSD é necessário considerar os seguintes elementos: o tamanho do sensor da câmera (Sc_x e Sc_y) sendo Sc_x relativo ao comprimento horizontal do sensor ao eixo x e Sc_y relativo ao comprimento do sensor, equivalente a vertical no eixo y, como em uma figura tridimensional, quando consideramos o solo em x e y, sendo z a altura de voo, a distância focal da câmera (f) e altura de voo (h), o qual podemos observar na figura 13, as formulas respectivas tanto para se saber o GSD quanto o tamanho máximo da imagem. De acordo com Santos (2014), pode-se considerar que a distância focal da câmera é a distância entre o sensor e o centro óptico da câmera e a altura de voo é a distância entre o sensor e a superfície física da Terra (Figura 17 e 18).

Figura 12. Relação do GSD x altura do voo, ou mesmo para um terreno acidentado varia de acordo com a altitude do RPA/VANT.



FONTE: <http://blog.droneng.com.br/variacao-de-gsd/> (2018).

Figura 13. Relação das formulas para se descobrir o GSD da foto, e o tamanho total em metros quanto ao comprimento e a largura do terreno que foi fotografado pela câmera embarcada. Tomando o terreno a ser imageado como plano cartesiano, (A) para cálculo do GSD relativo ao eixo x do comprimento longitudinal, (B) para cálculo do GSD relativo ao eixo y do comprimento vertical, (C) e (D) tamanho máximo da imagem em pixels no eixo x e y respectivamente.



$$\frac{Scx * h * 100}{f * PMx} = \text{GSDx (cm / pixel)} \quad \mathbf{A}$$

$$\frac{Scy * h * 100}{f * PMy} = \text{GSDy (cm / pixel)} \quad \mathbf{B}$$

$$\frac{\text{GSDx} * PMx}{100} = \text{tamanho máximo da imagem no comprimento em metros} \quad \mathbf{C}$$

$$\frac{\text{GSD} * PMy}{100} = \text{tamanho máximo da imagem na largura em metros} \quad \mathbf{D}$$

FONTE: Autor (2019).

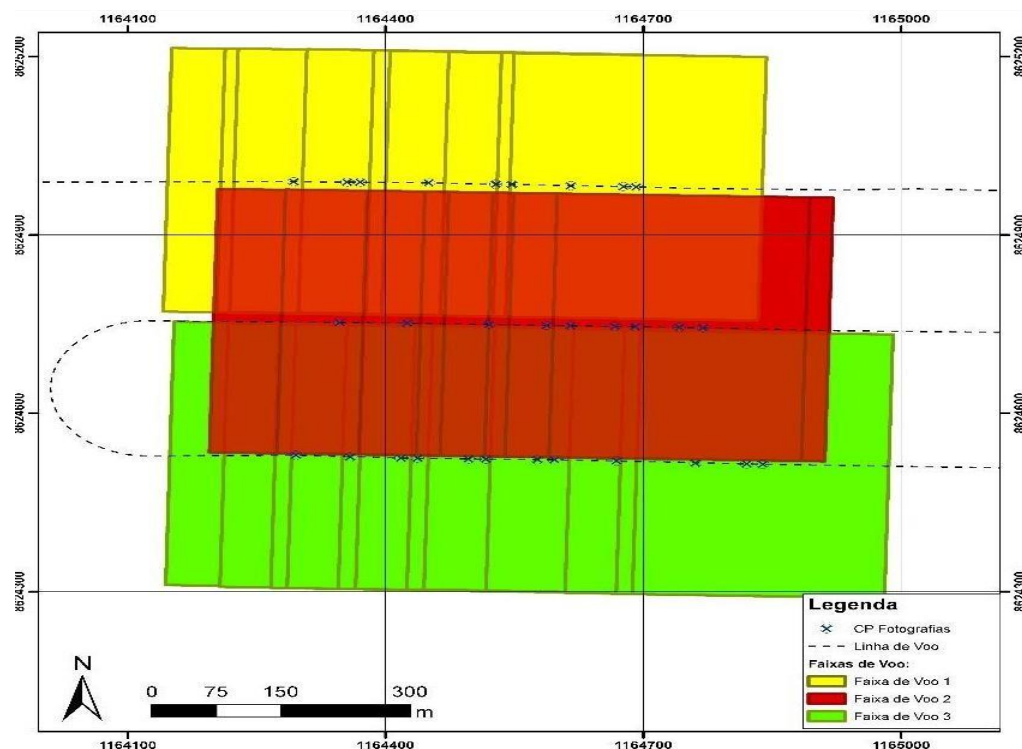
3.3.7 Sobreposição das fotos longitudinal e transversalmente

Na aerofotogrametria tradicional quanto ao recobrimento longitudinal e lateral, é utilizado na maioria dos casos um recobrimento longitudinal de 60% e lateral de 30%, neste caso a distância focal varia de acordo com o equipamento, altura e escalas para a qual o projeto será realizado das câmeras métricas, e dependerá sempre dos detalhes e escala desejadas. Adaptando-se as técnicas de aerofotogrametria tradicional a equipamentos portáteis como câmeras digitais não métricas aos veículos aéreos não tripulados utilizado no estudo, é necessário o aumento do recobrimento longitudinal e lateral para 70% e 50% consecutivamente, desta maneira, temos uma representatividade de como é realizada cada faixa de voo de recobrimento de cada imagem na figura 14.

Para a obtenção de resultados minimamente satisfatórios devido a instabilidades em que a plataforma de voo é submetida durante os voos e para atingir a maior área possível com a RPAS, e, quando possível, ou da necessidade de maiores detalhes na reconstrução destas imagens em mosaico, tanto quanto para a diminuição de erros quanto a distorções relativo as lentes e sensores com capturas distorcidas ou sem calibração previa, assim como condições climáticas não favoráveis na hora da tomada de fotos, aumenta-se esse recobrimento para 75%

e 70%, quando já é estimado uma porcentagem superior a 10% de fotos que não poderão ser aproveitadas devido a distorções nas imagens e/ou problemas de iluminação na hora da tomada das fotos (alternação da quantidade de lumens em dias nublados).

Figura 14. A figura mostra como é feito em teoria os voos de recobrimento aéreo com fotogrametria, é necessário um recobrimento lateral e um recobrimento longitudinal que possibilitará a reconstituição de várias fotos em uma única ortofoto.



FONTE: JÚNIOR, (2015).

3.3.8 Índices vegetativos utilizados

Além dos índices tradicionais utilizados durante este estudo como NDVI, NDWI, SAVI, OSAVI e GNDVI, ainda foi testado três formulas de índices de forma experimental com importantes observações complementares aos índices vegetacionais já conhecidos, além do índice de clorofila de borda verde (GBCl).

$$GBCl = \frac{NIR}{Green - 1}$$

$$Indice\ Teste\ 01 = \frac{Green - [NIR + (Redge - Red)]}{Green + [NIR - (Redge + Red)]}$$

$$Indice\ Teste\ 02 = \frac{(NIR + Redge - Red) - Green}{(NIR + Redge - Red) + Green}$$

$$Indice\ Teste\ 03 = \frac{(NIR - Redge - Red) - Green}{(NIR - Redge - Red) + Green}$$

Onde GBCI é o índice de clorofila de borda verde, e os outros índices, teste 01 designado output 11, teste 02 de output 13 e teste 3 de output 15. Completando equações 4, 5 e 6. Ainda, as equações de PRI e sPRI foram adaptadas para este caso em específico por não existir a disponibilidade do sensor de banda azul na câmera multiespectral utilizada, desta forma, as equações foram modificadas para resultados com menor distorção e mais próximo do que seria possível se a faixa de sensor do azul estivesse presente. Ficando a formula final de sPRI:

$$sPRI = \frac{\left[\frac{\left(\frac{Red}{1,35} - Green \right)}{\left(\frac{Red}{1,35} + Green \right)} \right] + 1}{2}$$

Conforme proposto, a banda vermelha foi dividida por 1,35 seguido do cálculo original da formula sPRI, reduzindo estes valores, próximos a banda do azul, ainda foi feita uma igualdade entre as bandas vermelha e verde para a determinação da saída de valores para a realização da falsa cor, porém, tanto no fluxograma de cores quanto nos índices, foram muito semelhantes, então a comparação de igualdade foi desconsiderada, deixando-se uma equação mais simplificada para o cálculo do índice. Sendo então, aplicada diretamente após isso, no CO2 Flux (NDVI x sPRI).

3.3.9 Processamento das imagens com uso de software

O processamento das imagens foi realizado por meio do software *Agisoft Metashape Professional Edition for Education*, uma licença adquirida pelo Laboratório de Análises Espacial e Ambiental (LANESA), na versão 1.8.5, utilizado para a análise das imagens e controle de qualidade dos produtos finais, gerados pelo software como ortofoto, MDS, nuvem de pontos e erros estimados a partir dos dados de GNSS da câmera digital, assim como a utilização das coordenadas local, a partir de pontos homólogos bem definidos das imagens do

software *Google Earth Pro* para um melhor controle de qualidade quanto a equivalência das imagens para auxílio quanto da análise das fotos retiradas em campo.

Criando e adicionado a um histórico de dados (imagens) dentro deste software (*Google Earth Pro*), sendo em conjunto, utilizado o software *QGIS* para processamentos mais refinados, quando estes relacionados a calculadora raster, colorações, plug-ins que vão auxiliar na transformação e análise das imagens com processamentos raster e vetoriais.

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 Do total das imagens obtidas

Nos dias 22 e 30 de novembro de 2022, foram capturadas imagens aéreas utilizando-se RPAS, sendo no dia 22 de novembro de 2022 com a RPAS *eBee Plus RTK/PPK* de propriedade da CODEVASF, e no dia 30 de novembro de 2022, com um *Phantom 4 Standard* de propriedade do Grupo Luiz Jatobá, sendo esses dados disponibilizados em forma de imagens, das quais, foram utilizadas um total de 1.931 imagens aéreas, como representados na tabela 1.

Tabela 1. – Lista dos locais, quantidade de imagens obtidas, data e tentativas da tomada de fotos.

Localidade	Data das Imagens Obtidas	Total de Imagens Obtidas	
		RGB	Multispectral
São Miguel dos Campos – AL	22/11/2022	273	1092
Grupo Luiz Jatobá	30/11/2022	548	0
TOTAL		821	1092

Fonte: Autor (2023).

4.2 Utilização de softwares Agisoft Metashape e QGIS

Durante o desenvolvimento do trabalho, foi utilizado o software *Agisoft Metashape*, a princípio, devido a facilidade de se conseguir uma chave de teste para utilizar o programa, o laboratório LANESA localizado no campus CECA, disponibilizou um computador, onde o mesmo possui uma instalação do *Agisoft Metashape for Education*. Além deste, foi utilizado também o software *QGIS*, um *software open source*, para a confecção do mapa tema da localização da área estudada.

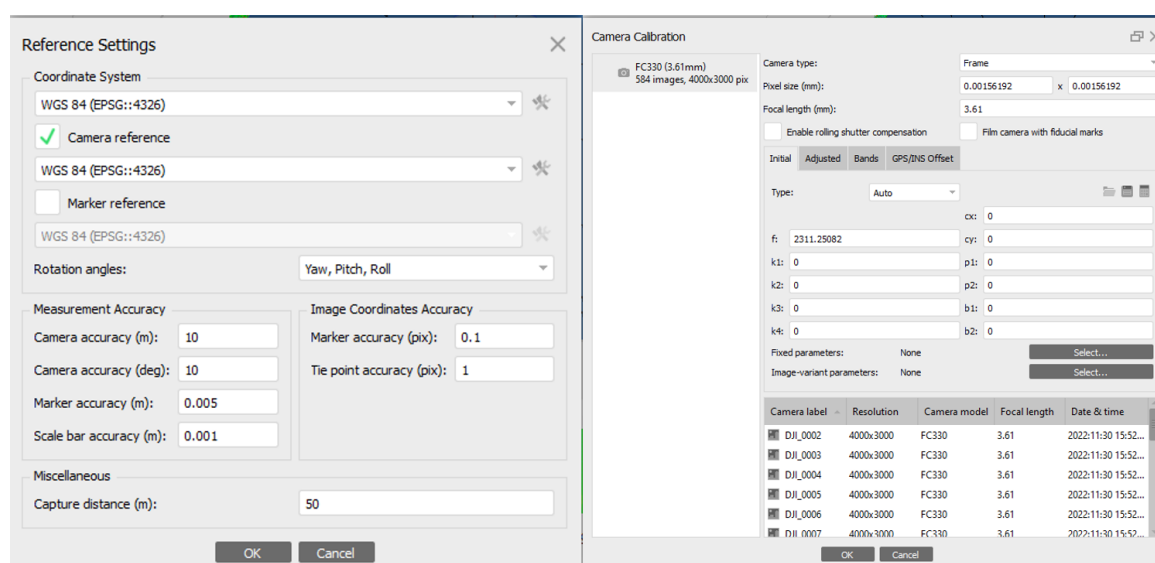
4.2.1 Procedimentos básicos para o processamento das imagens (dados)

As fotos foram separadas em pastas nomeadas com o local, mês e ano o qual estas foram tiradas, sendo separadas desta forma para que os arquivos e diretórios criados pelo processamento de dados do *Agisoft Metashape* não polua visualmente diretórios com vários dados de imagens tiradas em diferentes épocas, em seguida, dentro do projeto criado para o início do processamento de dados, é configurada uma série de parâmetros, como o sistema de coordenadas utilizada, geralmente, o sistema de coordenadas utilizadas por GPS embutido tanto

na câmera como no GPS do sistema de voo da RPAS, são o WGS 84. Problemas semelhantes são apresentados dentro de outros programas como o QGIS.

Além disso, para que os dados tenham uma maior confiabilidade quanto ao seu uso em produtos cartográficos e na geografia como um todo é necessário entrar com informações no programa a altura em que foi tomada as fotos, procedendo desta forma, os dados quanto a altimetria do MDS processado dentro do programa *Agisoft Metashape*, diminuindo o erro final da altitude de terreno quando utilizado com um GPS RTK e Base fixa, sendo mais assertivo na altimetria local do que apenas inserindo a altura em que o voo foi executado assim como outras opções de uso referencial das câmeras, marcos, coordenadas e acurácia dos equipamentos (Figura 15).

Figura 15. Configurações e calibrações básicas necessárias antes de iniciar o procedimento de alinhamento das fotos dentro do programa *Agisoft Metashape*. Como parâmetros das coordenadas utilizadas e distancia da captura das imagens, análise de foco, tipo, bandas e configurações extras advindas do GPS/ GNSS das imagens ou de equipamentos externos.



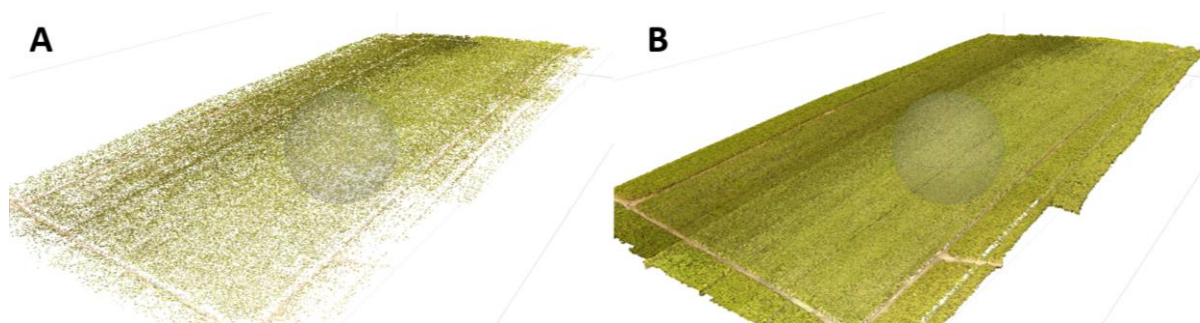
FONTE: Autor (2023).

4.2.2 Alinhamento das fotografias aéreas e nuvem de pontos

O alinhamento das fotografias aéreas é o segundo passo após alimentar o programa *Agisoft Metashape* com informações de altitude técnicas de voo, da câmera, de marcos ou pontos de controle, objetos de escala, como régua escalonada apropriadas para se utilizar com demarcação por exemplo. Juntamente com os *tie points*, em tradução livre, pontos de ligação e

limitação de identificação de pontos (*key points limit*), que são pixels que se correlacionam-se com o mais idêntico possível entre uma foto e outra (*k-nearest neighborhood*), tiradas em sequências trabalhando em conjunto com a quantidade limite de identificação destes pontos de sobreposição, é daí que se vem a necessidade do recobrimento lateral e transversal das imagens durante a tomada de fotos em voos com o RPAS (Figura 16).

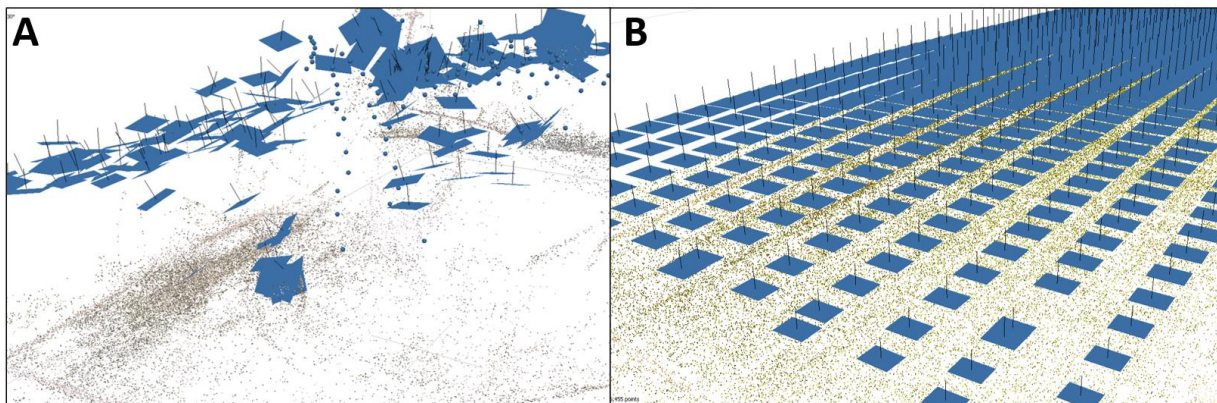
Figura 16. Diferenças entre alinhamento de imagens (A), primeiro procedimento realizando para que seja possível criar a nuvem de pontos, MDS e ortomosaico dentro do programa *Agisoft Metashape*. E da nuvem de pontos, da qual já podemos obter uma MDS e ortomosaico (B).



FONTE: Autor (2023).

Em relação ao sobreposição das imagens, estas quando menor que 60%, ou por algum motivo as imagens tomadas a ângulos maiores que quatro graus, sombreamento devido a inclinação solar, ouve necessidade diminuir a quantidade tanto dos pontos de ligação como na identificação destes pontos, para que o programa *Agisoft Metashape* conseguisse realizar o alinhamento das imagens (diminuição na qualidade do alinhamento das fotos), pois devido a “dispersão” na quantidade de dados coletadas, ângulos de inclinação não favorável ao processamento de dados, o *software* confundiu estes pontos, fazendo o sobre estaqueamento das imagens, gerando uma imagem totalmente distorcida (Figura 17.A).

Figura 17. Procedimento de alinhamento das fotos dentro do programa Agisoft Metashape. Na figura 24.A onde não foi possível fazer o alinhamento das fotos, e em 24.B, a utilização de imagens de outra câmera com *gimbal*, na mesma localidade.



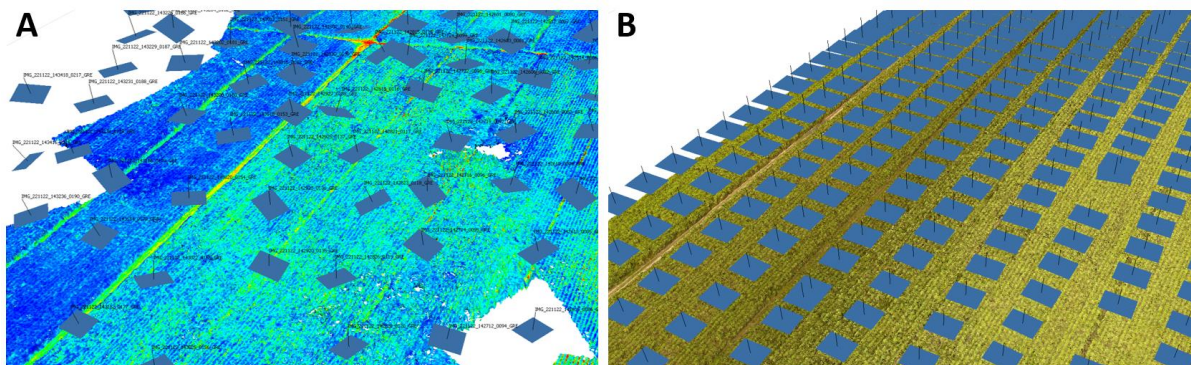
FONTE: Autor (2023).

No geral, o processamento das imagens, obtém-se um alto índice de pontos homólogos entre as imagens, quanto maior for a nitidez entre as imagens, maior será formação destes pontos. Tal situação também é justificável, devido ao fato, do plano de voo ser estabelecido em níveis de sobreposição lateral e longitudinal muito acima os quais aplicados em aerofotogrametria convencional. Esta sobreposição se fez necessário em razão da instabilidade da plataforma no instante de tomada de cada fotografia, principalmente para a plataforma de asa fixa sem o *gimbal*, esta instabilidade é ainda maior pois nem todas as fotos estão estabilizadas corretamente para o nadir, ponto relacionado aos zero graus em relação ao centro da Terra (Figura 18).

De um modo geral, as câmeras não métricas estão presas ao corpo da aeronave de asa fixa, portanto sua movimentação angular relativa ao nadir acompanha a atitude de movimentação de um sistema RPAS. Na fotogrametria convencional, a câmera é acoplada em uma plataforma giro estabilizada (*gimbal*), que mantém horizontalmente, com o foco do obturador apontada ao nadir e um dos lados da câmera paralela à direção da linha de voo.

Ao analisar o contorno das fotografias em relação ao vôo no exemplo da figura 23.A, nota-se que na mesma faixa não há mais do que duas fotografias paralelas, sendo que os enquadramentos de algumas giraram quase 40° em relação à linha de voo da RPA. Essa variação angular é conhecida como “crab”, geralmente provocada por ventos laterais, durante o voo, principalmente na existência de ventos laterais fortes à aeronave, a mesma gira a proa em direção aos ventos contrários, possibilitando que a aeronave consiga se deslocar, paralelamente à linha de voo projetada, fazendo com que sua proa aponte na direção do vento (JÚNIOR, 2015).

Figura 18. Exemplo de fotos no momento de sua tomada sendo representada dentro do programa *Agisoft Metashape*. No exemplo A, em um RPAS asa fixa sem *gimbal* e no exemplo B, em um RPAS de asa rotativa com *gimbal*. A disposição de cada retângulo é referente a uma imagem (foto), quanto direção, inclinação e de sua rotação em 3D, indica a posição da câmera na hora da tomada da foto.



FONTE: Autor (2023).

Nesse caso, se a atitude da câmera não for corrigida, ocorrerá o *crab*, alterando a sobreposição originalmente projetada. Devido a este fato, são utilizadas sobreposições acima da utilizada para aerolevantamentos tradicionais sendo longitudinalmente e lateralmente de 65 e 50% (no mínimo), contra os 40% e 50% respectivamente, e devido as características de voo neste tipo de equipamento (RPAS asa fixa), nota-se uma diminuição do nível de sobreposição do centro para as bordas, fato este indicativo para que a localização do objeto de estudo, esteja mais próximo do centro da área a ser imageada no momento do planejamento e, por conseguinte no mosaico.

4.2.3 Geração de MDS e ortofotos

As etapas anteriores permitiram o conhecimento da posição e atitude de cada fotografia aérea, bem como do modelo digital de elevação, no sistema cartográfico requerido. Os experimentos com configurações da ortofoto processada sem pontos de apoio, visou a potencialidade da RPAS *eBee Plus RTK/PPK* na obtenção de produtos cartográficos. Tal situação se fez necessária devido ao significativo aumento no desenvolvimento e comercialização de plataformas RPAS. Denota-se que, para todas as fotos em que foram utilizadas apenas o GPS da câmera da RPAS *Phantom 4 Standard*, o erro relativo das ortofotos

em relação aos sistemas cartográficos são altos, geralmente acima de 90 centímetros, e para plataformas mais avançadas como a RPAS *eBee*, o erro cai abaixo dos 50 centímetros.

E para sistemas montados do zero, denota-se erros equivalentes ou maiores, devido a um sistema que não tem seus componentes totalmente integrados em um mesmo produto, sendo a câmera do RPAS de asa fixa integrada com um GPS de baixa potência imbuído na câmera utilizada, onde muitas vezes, este não podia captar um bom sinal de GPS, sendo que, também foi verificado que sua velocidade de voo, também influenciou na qualidade final dos produtos (ortofotos em estado bruto), da mesma forma que JÚNIOR (2015), explica em seu trabalho de dissertação.

4.2.4 Interpretação dos índices através de composição de falsa cor

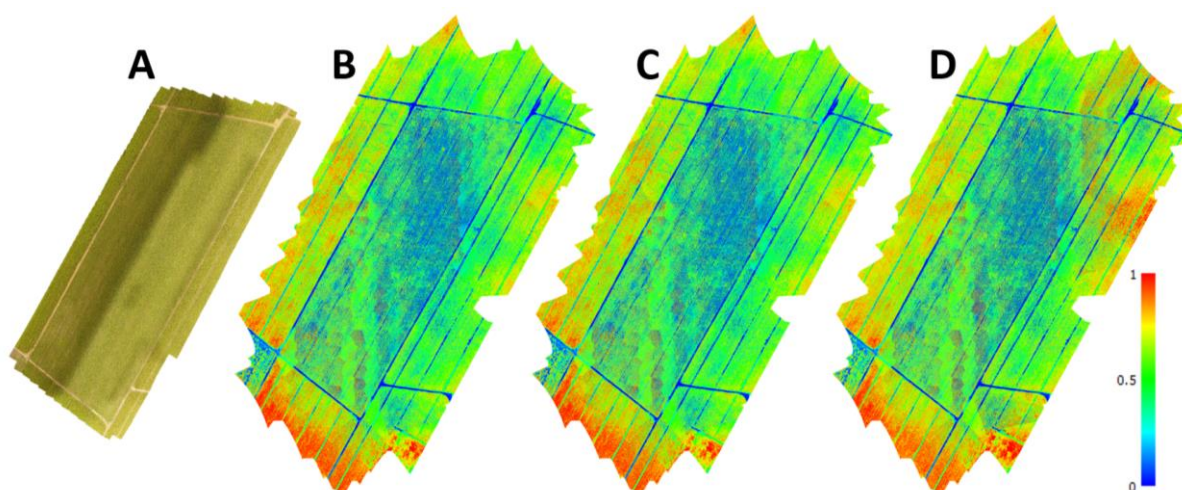
A interpretação tanto em bandas de satélite, como nas câmeras multiespectrais comum em seus sensores, para a criação de índices de vegetação, como o NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), pode ser realizada por meio da técnica da falsa cor. Essa técnica consiste na utilização de cores que não correspondem às cores reais da imagem, mas sim a uma representação das diferentes bandas espectrais. A técnica da falsa cor é utilizada para visualizar as áreas de vegetação de uma imagem de satélite. No caso do NDVI, após o seu cálculo, teremos um resultado que deverá ir de -1 a 1, porém, para câmeras acopladas a RPAS é um pouco mais incomum esta assertividade, por isso, foi utilizado o auto ajuste, disponibilizado dentro do próprio programa *Agisoft Metashape*, que faz esta calibração e transformação, utilizando uma simples regra de três, dando aos valores -1 por exemplo, de 0 e valores para valores iguais a 1, nivelado ao próprio valor 1, temos a partir das bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo (NIR) e representa a quantidade e a qualidade da vegetação presente em uma determinada área.

A interpretação do NDVI por meio da falsa cor ou de qualquer outro índice vegetativo, consiste em atribuir cores específicas aos valores, de forma a facilitar a visualização e a análise das áreas de vegetação. Geralmente, são utilizadas escalas de cores que variam do vermelho ao verde, onde as áreas com valores mais altos de NDVI são representadas para este trabalho foi vermelho, indicando uma maior densidade e saúde da vegetação, e cores mais baixas, o azul, indicando água, e o meio termo entre solo e vegetação morta o azul claro. E da mesma forma, para todos os outros valores de 1, vermelho, e para 0, o azul.

É possível notar que existe correlação direta entre o NDVI, SAVI e OSAVI na figura 19, além disso, é possível dizer também que o Índice de Área Foliar (IAF) possui correlação

direta com o NDVI. Porém, infelizmente isso não ocorre nas imagens acima, devido a fatores extremos presentes no momento em que foram adquiridas tais imagens, além da presença de muitas ervas-daninhas, existia a condição de uma alta pluviosidade, segundo o site da Cemaden, enquanto em novembro de 2022 foi registrado aproximadamente 174 mm, no ano anterior do mês de novembro, foi registrado apenas 22 mm de chuvas, além disso, na mesma forma que no trabalho de FIORI *et al* (2019), o comportamento espectral das folhas de cana-de-açúcar quando muito hidratadas, valores do infravermelho tendem a cair, desta forma, o mesmo aconteceu nos índices acima, devido ao alto stress hídrico na planta além da hiper-hidratação da mesma, e onde as águas da chuva tendem a empoçar combinado com fatores de competitividade através de ervas daninhas, os valores tanto de NDVI, SAVI e OSAVI, tenderam a ficarem abaixo de 0,6, sendo na sua maior parte da área central da imagem, valores entre 0,5 e 0,2. Mesmo com os menores valores calculados captados pelas imagens multiespectrais, com o menor valor de -0,2, e a zero (demostrado no histograma da figura 27.A), podendo conotar vegetação morta, solo exposto ou água, o OSAVI, conseguiu para este caso, atenuar os valores calculados e apresentar uma área com solo menos enxarcado, podendo apresentar uma melhora sanidade para as plantas presentes na direita superior, formando um C em vermelho.

Figura 19. Ortomosaico a esquerda (A) baseado na câmera do *Phantom 4 Standard*, (B, C e D) multiespectral Sequoia com o uso de GPS RTK de base fixa, nível de detalhamento entre os índices NDVI, SAVI, OSAVI.



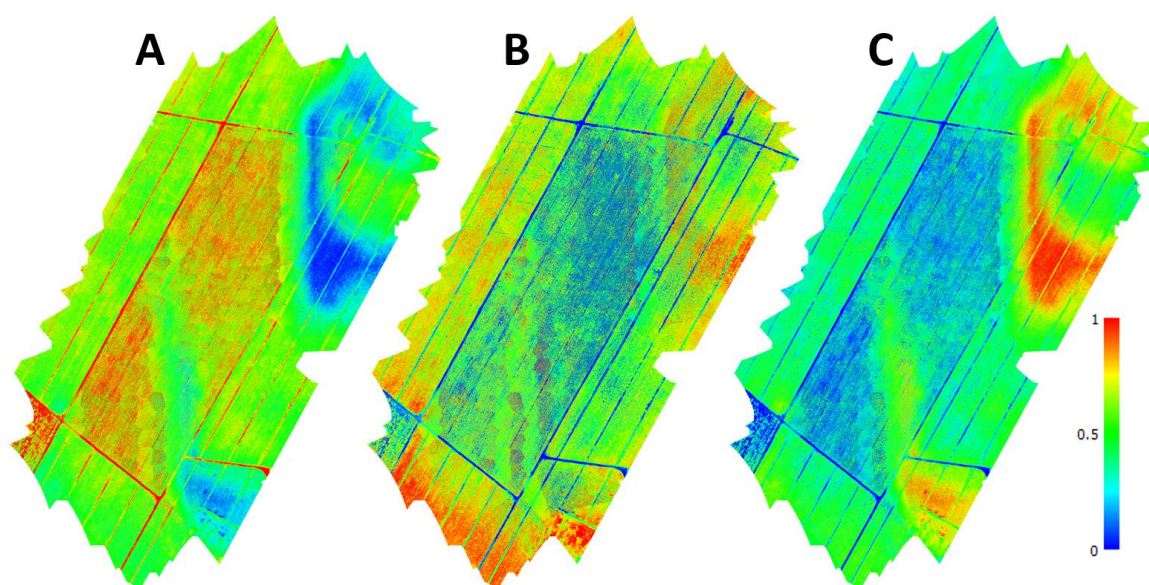
FONTE: Autor (2023).

Ainda, com os comparativos na figura 20, é possível observar uma correlação direta entre NDWI, GNDVI (com os valores invertidos entre ambos), indicando que a área superior a

direita em um formato de C realmente está menos encharcada, existindo uma correlação entre ambos com OSAVI, que captou a alteração hídrica na parte direita superior da imagem, a partir de uma melhor sanidade na vegetação naquela área. Ainda na área com valores próximos a 1 no índice NDWI e próximos a 0 em GNDVI, podemos constatar áreas com maior empoçamento de água, promovendo assim um maior stress hídrico na vegetação presente, sendo confirmado através do histograma na figura 31 D e E, que os gráficos se invertem entre NDWI e GNDVI. Sendo o uso de NDWI para a identificação de áreas úmidas e encharcadas enquanto o GNDVI é mais indicado sua utilização para encontramos áreas mais secas ou com um maior déficit hídrico tanto em solo, quanto na vegetação.

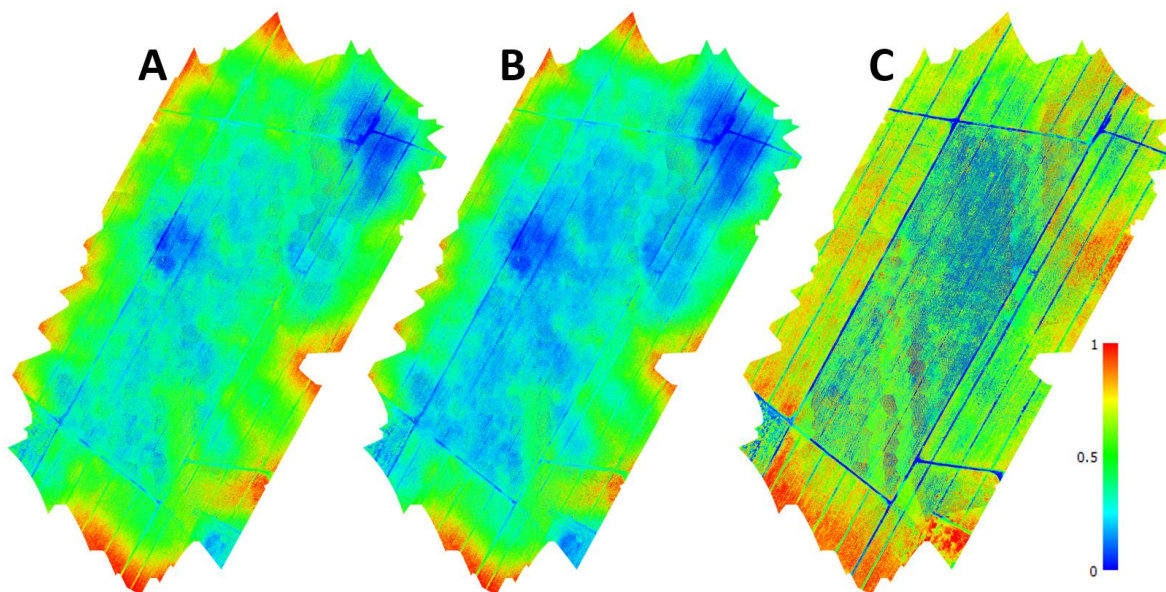
Na figura 21, observamos a correlação entre NDRE e RBCl, nas áreas com índices normais, geralmente, o NDRE se demonstra mais sensível em relação ao RBCl quando a clorofila da faixa da borda vermelha. Devemos observar que tanto o NDRE e o RBCl pode tratar do acumulo total de clorofila na folha do vegetal, sendo o RBCl quanto a produção de clorofila no momento em que é adquirida a imagem, indicando o seu amadurecimento, porém, o NDRE é um pouco mais sensível que o RBCl, sendo indicado para os locais do plantio onde o produtor deve ter maior atenção quando os valores estão próximos de zero para observar qual problema está ocorrendo naquele local, sendo possível notar, que as plantas com alto nível de stress não estão conseguindo acumular ou produzir clorofila.

Figura 20. Ortomosaico a esquerda (A) índice NDWI, (B) OSAVI, (C) GNDVI.



FONTE: Autor (2023).

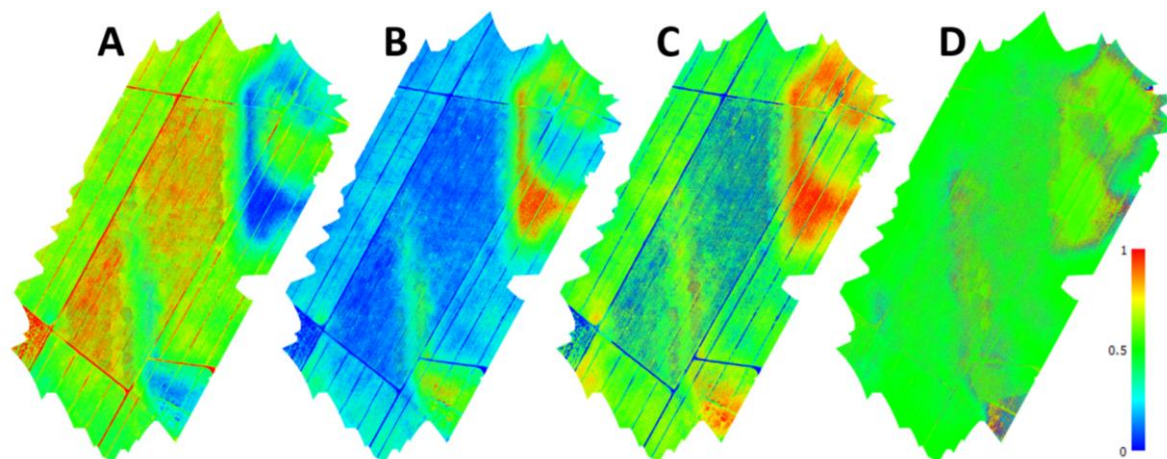
Figura 21. Ortomosaico a esquerda (A) índice NDRE, (B) RBCL, (C) OSAVI.



FONTE: Autor (2023).

É possível notar uma correlação entre o índice NDWI e o índice de clorofila verde (GBCL), índice denominado output 13, e índice denominado output 11 delimita áreas com pouco encharcamento, seus limites de cores podem indicar alterações no solo. No índice de clorofila verde, figura 22.B, notamos uma baixa atividade respiratória nas áreas em azul próxima de zero, e analisando a mesma área em 22.A, são áreas onde o solo está mais encharcado, evidenciando o excesso hídrico na cana-de-açúcar, provavelmente, devido ao baixo teor de oxigenação deste solo e raízes afogadas, e uma maior atividade respiratória (clorofila) quando nos deslocamos para as áreas com menor encharcamento de solo, no índice output 13, observamos uma combinação dos índices OSAVI, GBCL e NDWI, onde teremos áreas encharcadas e secas, combinadas com maior presença de atividade metabólica no local à medida que se aproxima do valor 1 (vermelho) na escala e cores escolhidas para a cor falsa. No output 11 temos uma combinação que está representando e delimitando os locais com solo mais úmido do solo mais seco.

Figura 22. Ortomosaico a esquerda (A) índice NDWI, (B) GBCI, (C) Output 13, (D) Output 11.

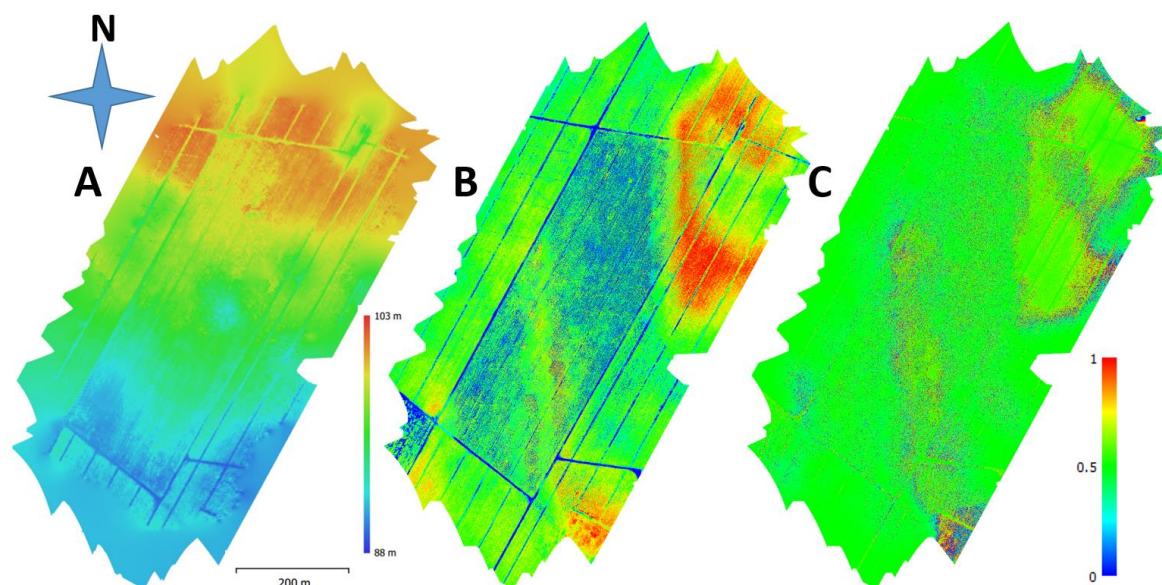


FONTE: Autor (2023).

Na observação da figura 23, onde temos MDS e dois índices vegetacionais não convencionais, quando comparamos o modelo digital de superfície aos índices output 13 e 11, é possível traçar com clareza a rota pela qual as águas das chuvas e inundação lixiviam o solo, podendo assim, desta forma, o local de interesse, neste caso, a área de estudo dos índices vegetacionais, possam ser tomada medidas de planejamento para evitarmos grandes áreas de encharcamento do solo em épocas anormais de chuvas.

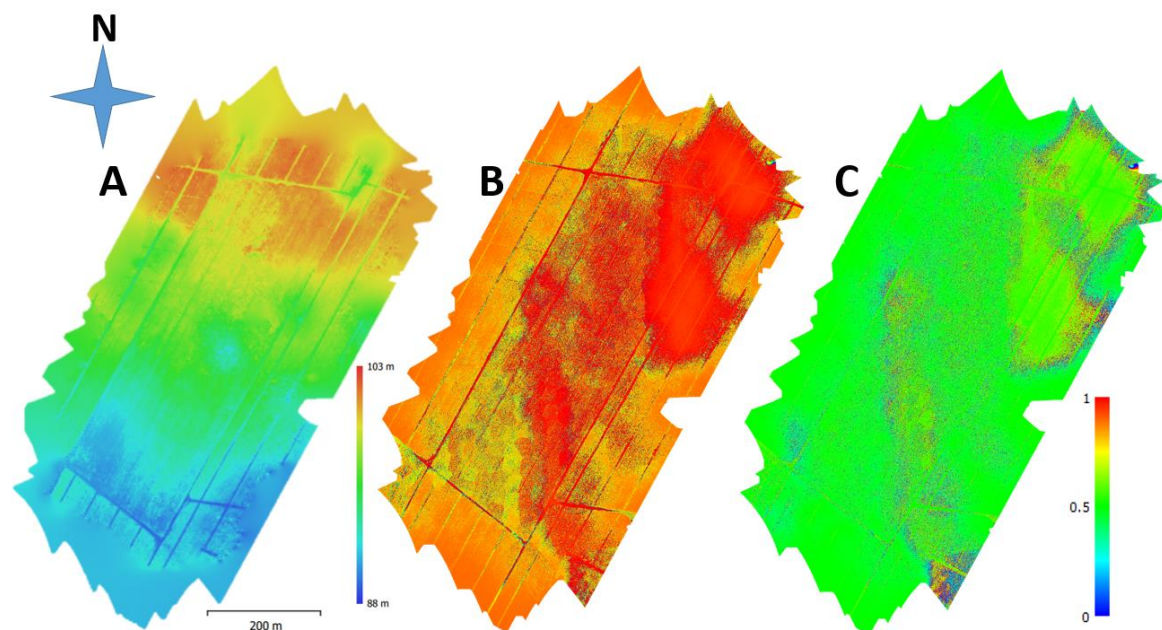
Já na figura 24, temos mais um modelo de índice vegetacional, derivado do output 11, onde seu índice output 15 teve seus valores cortados através do histograma da calculadora raster dentro do *Agisoft Metashape*, sendo ajustado manualmente, para uma melhor transformação e resposta quanto ao que se pretendia observar, desta forma, fazendo uma conexão direta entre o output 11 e OSAVI. Indicando desta forma os locais mais encharcados juntamente com locais mais secos no ortomosaico de falsa cor na figura 24.B.

Figura 23. MDS (A) , (B) Output 13, (C) Output 11.



FONTE: Autor (2023).

Figura 24. Ortomosaico a esquerda (A) MDS, (B) Output 15, (C) Output 11.



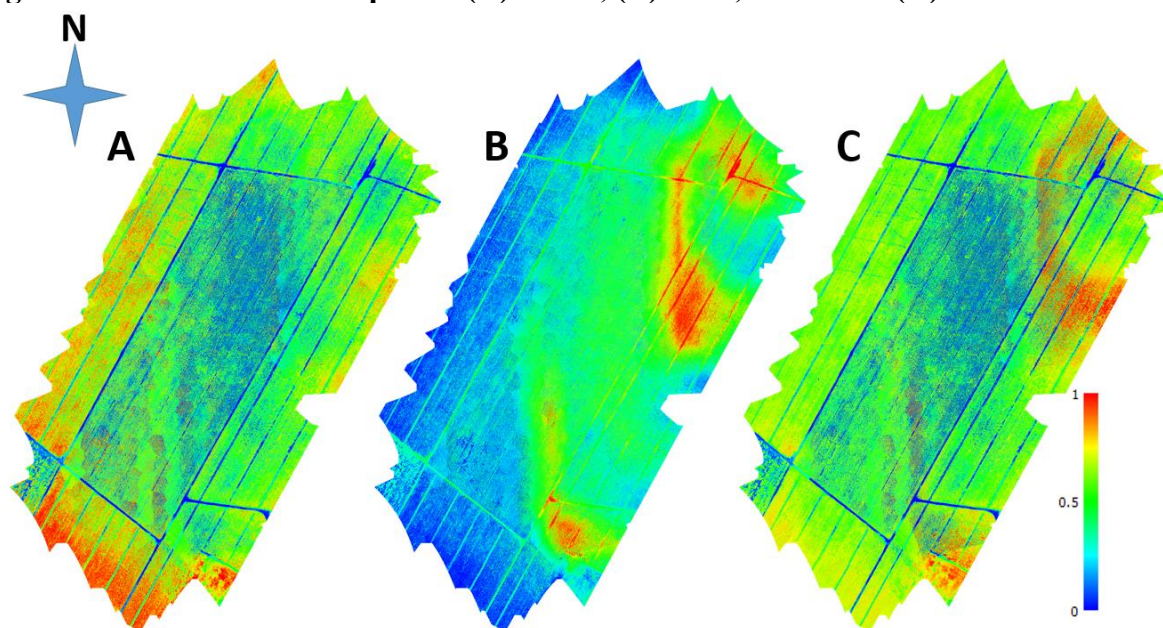
FONTE: Autor (2023).

Na figura 25, temos o NDVI, sPRI e o CO₂flux, como já foi dito anteriormente, o sPRI é o processo fotoquímico presente na parte clorofilada das plantas ajustado de -1 a 1, para 0 e 1, quanto maior o valor de 1 para este caso, maior é o processo fotoquímico que está ocorrendo naqueles plantas no momento em que foi obtida as imagens, é possível por meio de comparação, notarmos que nas áreas mais secas ou com menor encharcamento, uma elevada atividade

fotoquímica, principalmente em locais já identificados por meio de outros índices como o mais seco ou com menor encharcamento.

Para o índice calculado de CO₂flux, ou fluxo de CO₂, observamos que este se assemelha muito com o índice OSAVI, com algumas ressalvas, de forma a dizer, que a área com maior ataque de ervas daninhas, é justamente valores próximos a zero no índice em sPRI, porem em CO₂flux, áreas com maior encharcamento e relativo ao output 11, onde apresenta maiores bordas entre áreas encharcadas e secas.

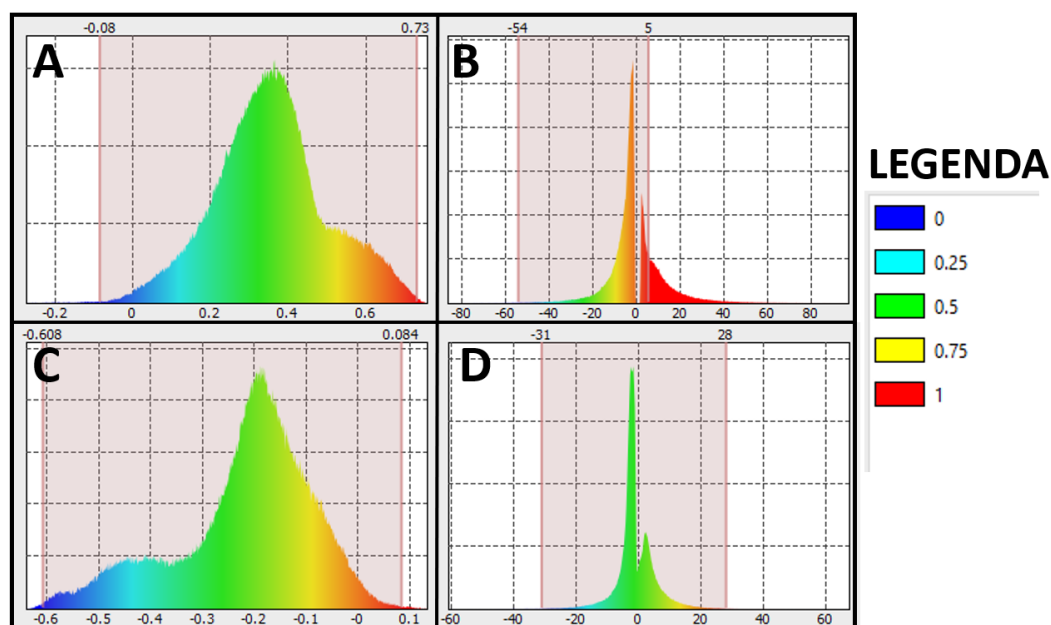
Figura 25. Ortomosaico a esquerda (A) NDVI, (B) sPRI, e a direita (C) CO₂flux.



FONTE: Autor (2023).

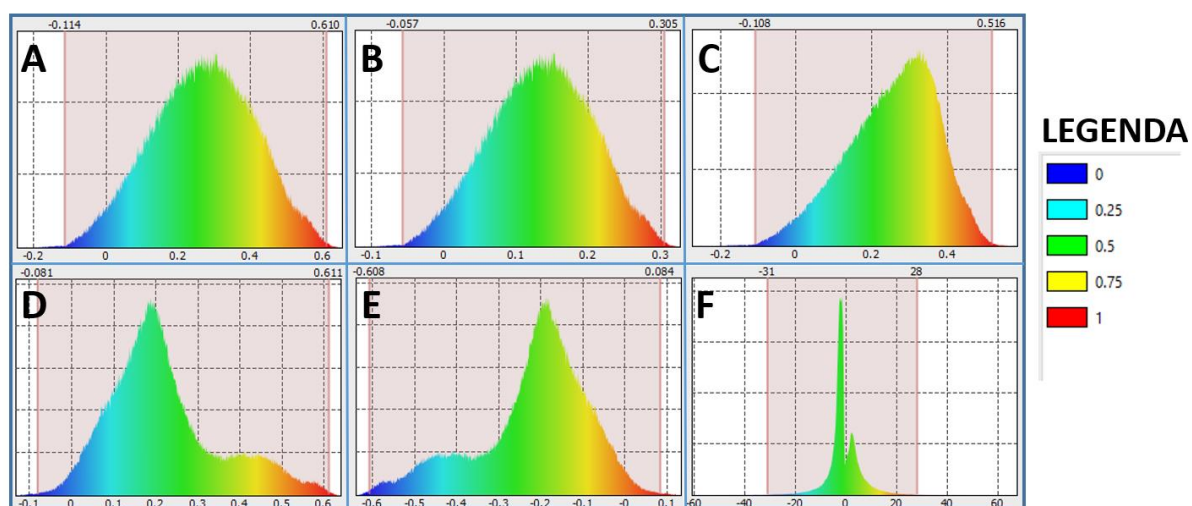
A partir do histogramas da figura 26, podemos notar que os resultados de refletâncias calculadas em output 11 e 15 são semelhantes, já na figura 27, observamos que o histograma de refletância para este estudo, tanto do NDVI quanto SAVI são muito semelhantes, com uma pequena diferenciação para o OSAVI, uma vez que com ele é possível refinar um pouco mais os resultados de saída, ocorrendo tal diferenciação no gráfico, já em 27.D e 27.E, GNDVI e NDWI, o resultado do cálculo raster, notamos a inversão de refletância, comprovando a indicação de uso para cada índice, como dito anteriormente.

Figura 26. Histograma de ajuste automático de (A) Output 13, (C) NDWI, (D) Output 11 e (B) ajuste manual de Output 15.



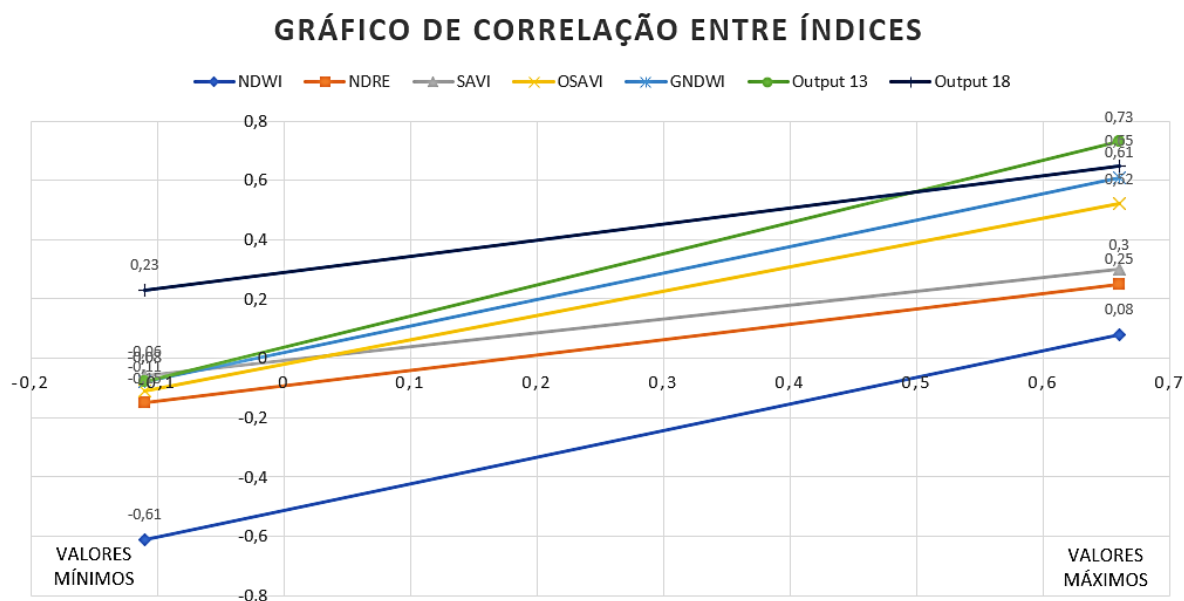
FONTE: Autor (2023).

Figura 27. Histograma de ajuste automático de (A) NDVI, (B) SAVI, (C) OSAVI, (D) GNDVI, (E) NDWI, (F) Output 11.



FONTE: Autor (2023).

Figura 28. Gráfico de correlação entre os índices vegetacionais.



FONTE: Autor (2023).

Na correlação entre índices através de gráficos (figura 28), quanto mais paralelo estiver cada linha do gráfico, maior a correlação entre um índice e outro, observamos que as correlações estão equivalentes tanto aos resultados, como ao que já foi observado, como por exemplo o NDWI e GNDVI estão paralelos entre si no gráfico apresentado.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível observar com este estudo, que as RPAS podem ser utilizadas em toda a safra da cana-de-açúcar, desde os períodos de pré-plantio até os períodos pós-plantio. As informações e uso como ferramentas de aplicação de insumos geradas por eles são de fundamental importância para o produtor rural, que pode utilizar das mesmas para um melhor gerenciamento no campo, facilitando as análises e as devidas tomadas de decisão. São observados impactos positivos na agricultura de precisão, auxiliando atividade de mapeamento; pulverização, melhorando a autonomia do processo, bem como trazendo precisão e segurança para o canavial e mão-de-obra; aspectos de tecnologia mais limpa, uma vez que reduzem o impacto ambiental negativo causado por maquinários e queima de combustíveis; análises automatizadas, por meio do mapeamento, tratamento e qualidade dos dados.

Assim, a utilização de tecnologias como RPAS vem ganhando cada vez mais espaço no setor agrícola, seja de qual cultura estivermos falando. O uso desses equipamentos se demonstrou vantajoso por diversos motivos, entre eles a possibilidade de redução de custos e aumento da eficiência no processo produtivo. Além de sua capacidade de capturar imagens aéreas de alta qualidade e em tempo real, permitiu identificar áreas com diferentes características, bem como, auxiliou na avaliação de possíveis problemas nas lavouras, como o alto stress hídrico, doenças ou até mesmo partes da área com baixa produtividade.

Ainda, com a utilização de RPAS conseguimos contribuir para a redução de custos no setor agrícola. Durante a identificação precoce de problemas nas lavouras, é possível realizar intervenções mais eficientes e direcionadas, evitando gastos desnecessários com insumos ou agroquímicos. Além disso, as RPAS também podem ser utilizados para a aplicação de defensivos agrícolas de forma mais precisa e controlada, reduzindo o desperdício de produtos e diminuindo os impactos ambientais.

E apesar dos benefícios trazidos pela utilização de RPAS, ainda existem desafios a serem enfrentados. Um dos principais obstáculos é a acessibilidade dessas tecnologias, uma vez que os equipamentos ainda possuem um alto custo de aquisição e implantação. Além disso, é preciso garantir a segurança dos equipamentos e a qualidade das informações coletadas, para evitar erros na tomada de decisão. Outro desafio é a capacitação dos profissionais envolvidos na utilização dessas tecnologias. É necessário que os agricultores e técnicos responsáveis por operar as RPAS, estejam capacitados para utilizá-los de forma eficiente e segura. Isso pode incluir a necessidade de treinamento em aspectos técnicos da operação dos equipamentos, bem como em análise de dados e interpretação das informações coletadas pelos mesmos.

É importante frisar também questões relacionadas à segurança e privacidade dos dados coletados pelas RPAS. A utilização dessas tecnologias pode gerar grandes volumes de informações sobre as propriedades agrícolas, como áreas de plantio, produtividade, uso de insumos e recursos hídricos, entre outros. É fundamental garantir que essas informações sejam protegidas e utilizadas apenas para fins legítimos, como o aumento da eficiência e produtividade das lavouras. Concluindo-se assim, que devemos observar quanto a escolha da ferramenta quando tratamos de uma RPAS de asa fixa ou asa rotativa, sendo que, a partir de uma asa fixa, poderemos sempre ter uma visão geral do campo aliado a uma grande área de cobertura, enquanto da asa rotativa, ainda teremos uma visão mais detalhada e intrínseca, porém com uma área de cobertura menor.

REFERÊNCIAS

AGISOFF METASHAPE USER MANUAL: Professional Edition, Version 1.8. 2022. Disponível em: < https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_8_en.pdf > Acesso em: 24 de janeiro de 2023.

ALMEIDA, A. C. S; et al. Desenvolvimento vegetativo e produção de variedades de cana-de-açúcar em relação à disponibilidade hídrica e unidades térmicas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, p. 1441-1448, 2008.

ANAC. Agência Nacional de Aviação Civil. **Regulamento brasileiro da aviação civil especial**. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94/@@display-file/arquivo_norma/RBACE94EMD00.pdf > Acesso em: 31 março 2023.

ANDRADE, J. B. de. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998. 258p.

ASPIAZÍ, C.; ALVES, L. M.; VALENTE, O. F. **Os modelos digitais de terrenos conceituação e importância**. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n.21, dez. p.2736, 1990.

BERNARDI, A. C. C.; et al. **Agricultura de Precisão, Resultados de um Novo Olhar**. Disponível em <<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1002959/agricultura-de-precisao-resultados-de-um-novo-olhar>> Ed. v.1. Brasília: Embrapa, 600 p. 2014. Acesso em: 30 de janeiro de 2017.

BRASIL. Comando da Aeronáutica. Departamento de Controle do Espaço Aéreo. *Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro: ICA 100-40*. Rio de Janeiro, RJ, 2015.

COSTA, G. C., SILVA, D. C. Classificação de Mapeamento Aerofotogramétrico Com Imagens Obtidas de Câmeras Não-Métricas Para Fins de Projeto de Estradas. **Revista Brasileira de Cartografia (Impresso)**, 2009.

CRUZ, S. C. S; *et al.* Adubação nitrogenada para o milho cultivado em sistema plantio direto, no Estado de Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, p. 62-68, 2008.

DECEA, Departamento de Controle do Espaço Aéreo: página do Departamento de Controle do Espaço Aéreo Disponível em: <<http://www.decea.gov.br/drone/>>. Acesso em: 25 de agosto de 2018.

EUGENIO, FERNANDO & ZAGO, HUGO. **O livro dos drones: um guia completo para entender todas as partes e funcionamento**. 2019.

FAO. FAOSTAT. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>. Acesso em: 26 jan. 2023.

FIORI, PERTESON & COELHO, RUBENS & BARROS (2019). **Comportamento espectral das folhas de cana-de-açúcar na presença de déficit hídrico**. *Irriga*. 23. 609-621. 10.15809/irriga.2018v23n3p609-621.

IEA. Bioenergy: International Energy Agency. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/bioenergy>. Acesso em: 26 jan. 2023.

HAKAMADA, R. E. **Uso do inventário florestal como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural em povoamento clonais de *Eucalyptus***. 2012. 115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”. Piracicaba – SP.

HIRT, C. (2016). Digital Terrain Models. Encyclopedia of Geodesy. 10.1007/978-3-319-02370-0_31-1. **Definition Digital Terrain Model. Digital description of the terrain surface using a set of heights over 2D points residing on a reference surface**. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/278683672_Digital_Terrain_Models>. Acesso em 26 de abril de 2019.

HUETE, A. "A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI)." Remote Sensing of Environment 25 (1988): 295-309

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br>> Acesso: 15 de maio de 2019.

JORGE, J.; VALLBÉ, M.; SOLLER, J. A. (2019) **Detection of irrigation inhomogeneities in an olive grove using the NDRE vegetation index obtained from UAV images**, European Journal of Remote Sensing, 52:1, 169-177, DOI: 10.1080/22797254.2019.1572459

JÚNIOR, L. R. A. **Análise de produtos cartográficos obtidos com câmera digital não métrica acoplada a um veículo aéreo não tripulado em áreas urbanas e rurais no estado de Goiás**. 2015. 114f. Dissertação (Mestrado em Geografia). Instituto de Estudos Socioambientais, Universidade Federal de Goiás.

L3HARRIS, Broadband Greenness, disponível em <<https://www.l3harrisgeospatial.com/docs/broadbandgreenness.html>>, acessado em março de 2023.

LUCHETTI, A. **Utilização de drones na agricultura: impactos no setor sucroalcooleiro**. 2019. Monografia (Graduação em Ciências Aeronáuticas) – Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, SC, 2019.

LUZ, C. C. DA. **Avaliação da exatidão absoluta de ortofoto obtida por meio de dados brutos oriundos de veículos aéreos não tripulados (sisvant)**. 2015. 118f. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) – Setor de Ciências da terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2015.

RONDEAUX, G., M. STEVEN, BARET, F. "Optimization of Soil-Adjusted Vegetation Indices." Remote Sensing of Environment 55 (1996): 95-107.

ROUSE, J., HAAS, R., SCHELL, J., DEERING, D. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Third ERTS Symposium, NASA (1973): 309-317.

SILVA, P. H. M.; ANGELI, A. **Implantação e manejo de florestas comerciais**. IPEF – Documentos florestais n. 18. Mai. 2006.

SLOMPO, P. J. H. **Utilização de um veículo aéreo não tripulado para obtenção de dados dendrométricos de *Eucalyptus benthamii* Maiden et ambagem.** 2013. 51f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Agronomia) – Setor de Produção Vegetal, Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava, PR, 2013.

UAV Forecast, previsões climáticas e de índice Kp. Disponível em: <<https://www.uavforecast.com/#/>>, Acesso em 19 de maio de 2021.

US Army. Photogrammetric Mapping – **EM 1110-1-1000** – Engineer Manual (Series Engineering and Design). U.S. Army Corps of Engineers. Washington DC, Estados Unidos: 2002.