

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL

**VANT-RTK: UMA TECNOLOGIA PRECISA E ACURADA PARA
MAPEAMENTO DE FALHAS EM CANA-DE-AÇÚCAR**

MATHEUS PEREIRA DE OLIVEIRA

Orientador: Prof. Drº Rouverson Pereira da Silva
Coorientador: MSc. Marcelo Rodrigues Barbosa Júnior

**Trabalho apresentado à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP,
Câmpus de Jaboticabal, para graduação
em ENGENHARIA AGRONÔMICA.**

Jaboticabal - SP
9º Semestre/2023

O48v

Oliveira, Matheus Pereira de

Vant-RTK: uma tecnologia precisa e acurada para mapeamento de falhas em cana-de-açúcar / Matheus Pereira de Oliveira. -- Jaboticabal, 2023
37 f.

Trabalho de conclusão de curso (-) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal

Orientador: Rouverson Pereira da Silva

Coorientador: Marcelo Rodrigues Barbosa Júnior

1. Saccharum spp.. 2. Imagens aéreas. 3. Acurácia posicional. 4. Sítio específico. I. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CÂMPUS DE JABOTICABAL

DEPARTAMENTO: Engenharia e Ciências Exatas

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO
TRABALHO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA

TÍTULO: VANT-RTK: UMA TECNOLOGIA PRECISA E ACURADA PARA
MAPEAMENTO DE FALHAS EM CANA-DE-AÇÚCAR

ACADÊMICO: Matheus Pereira de Oliveira

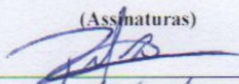
CURSO: Engenharia Agrônômica

ORIENTADOR (ES): Profº Drº Rouverson Pereira da Silva
MSc. Marcelo Rodrigues Barbosa Júnior

Aprovado e corrigido de acordo com as sugestões da Banca Examinadora

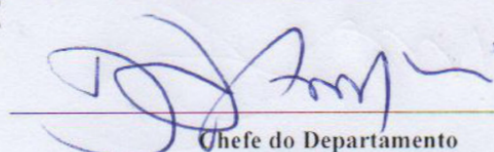
BANCA EXAMINADORA:

	(Nomes)
Presidente	Profº Drº Rouverson Pereira da Silva
Membro	MSc. Romário Porto de Oliveira
Membro	Paulo Henrique Cardoso

(Assinaturas)

Rouverson P. de Oliveira
Paulo H. Cardoso

Jaboticabal 19 / 06 / 2023

Aprovado em reunião do Conselho do Departamento em: 27 / 6 / 2023, por ato "ad
referendum".



Chefe do Departamento
Prof. Dr. Danisio Prado Munari
Chefe do Depto. de Engenharia
e Ciências Exatas

OFERECIMENTOS

Dedico esta conquista a Deus, aos meus pais e todos os professores que fizeram parte da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, todas oportunidades e também por ter me dado força e coragem durante essa caminhada para superar todos os desafios.

Aos meus pais, Rosangela Gonçalves Pereira Oliveira e Egnaldo Cruz de Oliveira, pelo amor, carinho, paciência, ensinamentos e por depositarem toda a confiança em mim e não medirem esforços para que tivesse a oportunidade de estudar em uma universidade pública, sempre com muito amor e zelo, no decorrer da nossa trajetória e em toda minha vida.

À minha namorada Isabela de Lima por estar sempre ao meu lado, estando sempre a disposição para poder me ajudar com muita paciência e me encorajando em todos os momentos.

Aos meus amigos e todos os familiares por estarem ao meu lado durante esses cinco anos de graduação.

Ao meu orientador Rouverson Pereira da Silva, que aceitou o desafio de continuar o trabalho e sempre me ajudando a cada passo a ser dado nesse estudo, sempre estando dedicado e de prontidão em todos os problemas a serem sanados, expresso grande admiração pelo professor e por sua pessoa, obrigado por toda dedicação e por todos os ensinamentos que proporcionou.

Ao coorientador Marcelo Rodrigues Barbosa Júnior, por estar sempre a disposição e ajudando em todo este estudo, auxiliando em todos os momentos, estando sempre a ajudar com boa vontade e com o sorriso no rosto, agradeço imensamente pela dedicação que teve comigo e sempre estar de prontidão, tenho muita admiração por você.

Ao Professor Cristiano Zerbato por me convidar a iniciar as pesquisas envolvendo sensoriamento remoto e me auxiliar na conquista de uma bolsa de iniciação científica pela FAPESP, estando sempre a disposição para poder ajudar.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de iniciação científica (Projeto N° 2019/25238-6).

Agradeço também a todos os professores que fizeram parte da minha vida acadêmica, pelos ensinamentos, orientação, confiança que depositaram em mim.

E por fim todas as pessoas que de alguma forma contribuíram no meu processo de formação acadêmica.

RESUMO

Veículos aéreos não tripulados (VANT's) equipados com sistema global de navegação por satélite (GNSS) com correção de sinal em tempo real (RTK) poderia ser uma solução de ponta para identificar falhas em campos de cana-de-açúcar e permitir ações específicas do local. Portanto, neste estudo foi avaliado o potencial das imagens do VANT RTK para o mapeamento de falhas em campos de cana-de-açúcar. Para comparar esta solução com abordagens convencionais de VANT, foram avaliadas as precisões e acurácias dos voos RTK e não-RTK. Para aumentar a robustez da investigação, foram realizados voos para mapear falhas encontradas naturalmente no campo e com plantas em diferentes fases de desenvolvimento. Os resultados mostraram que o comprimento das falhas identificadas tanto por imagens de VANT RTK como não-RTK eram semelhantes. As diferenças em precisão e acurácia foram cerca de 1% para ambos os sistemas. Contudo, com respeito ao posicionamento das falhas, RTK foi muito mais eficiente e confiável em comparação o não-RTK. As conclusões são importantes e dão-nos diretrizes para o posicionamento preciso e acurado de mapas de falhas, permitindo aos produtores tomar decisões assertivas sobre ações específicas do local.

Palavras-chave: *Saccharum* spp., imagens aéreas, acurácia posicional, sítio específico.

ABSTRACT

Unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with a global navigation satellite system (GNSS) with real-time signal correction (RTK) could be a cutting-edge solution to identify faults in sugarcane fields and allow specific actions by the local. Therefore, in this study, the potential of UAV RTK images for mapping faults in sugarcane fields was evaluated. To compare this solution with conventional UAV approaches, the precision and accuracy of RTK and non-RTK flights were evaluated. To increase the robustness of the investigation, flights were carried out to map faults found naturally in the field and with plants in different stages of development. The results showed that the length of faults identified by both RTK and non-RTK VANT images were similar. Differences in precision and accuracy were around 1% for both systems. However, with respect to fault placement, RTK was much more efficient and reliable than non-RTK. The conclusions are important and give us guidelines for the precise and accurate positioning of fault maps, allowing producers to make assertive decisions about specific actions in the location.

Keywords: *Saccharum* spp., aerial images, positional accuracy, specific place.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	11
2.1	Cana-de-açúcar: breve histórico e importância econômica	11
2.2	Falhas no canavial: as grandes vilãs da produtividade	13
2.3	Métodos para mapeamento e identificação de falhas no canavial	15
2.4	Mapeamento com VANT-RTK: uma alternativa para ações localizadas	16
3	MATERIAL E MÉTODOS	19
3.1	Ambiente de estudo.....	19
3.2	Medições em campo	19
3.3	Missões de voo	20
3.4	Processamento dos dados fotogramétricos.....	21
3.5	Medição das falhas pelas imagens.....	22
3.6	Validação dos dados	23
4	RESULTADOS.....	25
4.1	Caracterização da altura de plantas	25
4.2	Medição das falhas	26
4.3	Erros dos sistemas GNSS	28
5	DISCUSSÃO	30
5.1	Mapeamento de falhas em cana-de-açúcar: devemos usar RTK?	30
6	CONCLUSÕES	34
	LITERATURA CITADA	35

1 INTRODUÇÃO

Cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) é a principal cultura utilizada para produção de açúcar, bioetanol e bioenergia, o que a torna umas das principais commodities relevantes para a economia (BARBOSA JÚNIOR et al., 2022). No mundo, países como Brasil, Índia e China são os maiores produtores da cultura, produzindo cerca de 2 bilhões de toneladas de cana-de-açúcar por ano (STATISTA, 2022). A cana-de-açúcar é uma cultura semi-perene, geralmente 12 meses após o plantio a cultura está pronta para ser colhida e enviada para os processos industriais. Após a colheita, a parte vegetativa (soqueira) que permanece no solo dá origem a novos brotos e inicia um novo ciclo da cultura. Alguns anos atrás, a cana-de-açúcar suportava até 10 colheitas desde o primeiro plantio. No entanto, a partir da intensificação dos processos mecanizados de colheita e tratamentos culturais, três a cinco colheita é o mais comum (HAN; BISHOP; FILIPPI, 2022). Principalmente devido à danos e abalos à soqueira, compactação do solo, que contribuem negativamente com a longevidade do cultivo, aumentando a presença de falhas nas linhas de cultivo (MATSUOKA & STOLF, 2012; MOLIN & VEIGA, 2016; RAPER, 2005; SANTOS et al., 2013; ZHAO et al., 2019).

Falhas em cana-de-açúcar são definidas como espaços vazios, entre dois colmos, maior que 0,50 m e, embora sejam indesejáveis, até mesmo campos de produção mais avançados tecnologicamente têm, em média, 20% de falhas (STOLF, 1986). Portanto, a identificação de falhas em campos de cana-de-açúcar é importante e pode ajudar produtores em tomada de decisões relativas

à replantio, reforma do campo, estimativas de produtividade e mesmo aplicações específicas do local, evitando aplicações de insumos sob falhas, além de técnicas como tráfego controlado de máquinas para evitar pisoteio sobre a soqueira. A literatura científica apresenta estudos promissores que utilizaram técnicas sofisticadas para identificar falhas em cana-de-açúcar. Na abordagem proposta por Luna e Lobo (2016), os pesquisadores utilizaram um método de fotointerpretação utilizando imagens RGB de VANT como uma alternativa aos métodos tradicionais de medição de campo. Os resultados encontrados mostraram alta precisão ($R^2 = 0,9$) e alta acurácia (RMSE = 5,04). Na investigação de Souza et al. (2017), os autores utilizaram imagens capturadas pelo VANT com filtros espectrais para Green, Red e NIR. As imagens foram processadas pela técnica de análise de imagem baseada em objeto (OBIA) e os resultados das falhas medidas no campo foram comparados com as falhas estimadas pelas imagens com precisão de 0,97. Pesquisando ainda mais na literatura, foi encontrado a pesquisa proposta por Barbosa Júnior et al. (2021). Neste estudo, os autores utilizaram imagens RGB capturadas por VANT para estimar falhas em cana-de-açúcar e forneceram as melhores estratégias para um mapeamento através da combinação da melhor altura de voo e da melhor fase de desenvolvimento das plantas. Até agora, estes são os resultados mais completos e precisos da literatura ($R^2 = 0,97$, erro absoluto = 0,015 m).

Em geral, os estudos apresentados acima foram relevantes e contribuem para resolver problemas no mapeamento de falhas. Contudo, são ainda aplicações limitadas. Uma vez que o mapeamento de falhas permite decisões de replantio e ações específicas do local, à precisão posicional é o ponto chave para

que os resultados analisados sejam aplicáveis. No entanto, os estudos de mapeamento de falhas existentes não têm sido direcionados a este aspecto. Deste modo, investigações que utilizam sistemas posicionais de alta precisão, tais como VANT RTK, seriam uma das formas de garantir resultados de falhas totalmente utilizáveis. Portanto, são necessários novos estudos.

Neste estudo, apresentamos uma proposta inovadora no mapeamento de falhas em cana-de-açúcar. Aqui usamos VANT com sistemas RTK e não-RTK para capturar imagens e identificar falhas em campos de cana-de-açúcar com diferentes alturas de planta. Os dados encontrados nos dois sistemas foram comparados um com o outro e validados em relação às observações de campo, apontando o método de coleta de imagens que apresenta melhores resultados.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cana-de-açúcar: breve histórico e importância econômica

A cana-de-açúcar pertencente a família Poaceae, subfamília Panicoideae, tribo Andropogoneae e gênero *Saccharum* L. (AMARAL, SANTOS & BARBOSA, 2015). Seu centro de origem, segundo relatos históricos, é na região de Nova Guiné e, com a imigração, a cultura chegou ao sudeste asiático, Índia e China, passando assim por melhoramento genético e hibridação de materiais silvestres (AMARAL, SANTOS & BARBOSA, 2015).

Em 1502 a cultura chegou ao Brasil por meio da colonização dos portugueses e começou a ser produzida em áreas pequenas devido à escassez de mão-de-obra, principalmente na região litorânea (FIGUEIREDO, 2008; RODRIGUES & ROSS, 2020). A partir do ano de 1532, o rei D. Manuel, decidiu introduzir a cana-de-açúcar no Brasil em larga extensão e a construção de engenhos para produção de açúcar, principalmente na Capitania de São Vicente (MIRANDA, 2008; FIGUEIREDO, 2008). A cultura passou durante muitos anos por melhoramento genético, tecnificação e expansão territorial. Em meio ao século XX os engenhos evoluíram, passando a ser denominados de usinas sucroalcooleiras, devido a produção de açúcar e etanol. No início do século XXI, passou a ser usinas sucroenergéticas por também gerarem energia elétrica (RODRIGUES & ROSS, 2020).

A cana-de-açúcar é uma das principais matérias-primas para produção de açúcar e etanol, ambos produzidos por meio de processos industriais realizado

com o caldo extraído dos colmos das plantas (VIAN, 2022). Nos últimos anos, outro produto tem sido a geração de energia, a partir da queima do bagaço residual do processo de moagem, conseguindo produzir 2.110 MJ com 280 kg de bagaço (ALCARDE, 2022; SANTOS & BORÉM, 2016). Alguns outros subprodutos também são obtidos, como vinhaça e torta de filtro, que podem ser utilizados como fertilizantes orgânicos (ALCARDE, 2022). Além dos colmos, a palha que fica no campo após o processo de colheita pode ser recolhida e utilizada para também gerar energia através da queima, com a mesma eficiência energética do bagaço, outra opção é a produção de etanol celulósico (SANTOS & BORÉM, 2016). A fermentação e destilação do melaço de cana-de-açúcar também pode produzir a cachaça (SAKAI, 2022).

A cana-de-açúcar tem grande importância mundial, no ano de 2020 foram cultivados no mundo 26,47 milhões de hectares e produzidos 1.869,71 milhões de toneladas (FAO, 2020). Dentre os continentes, 54% da produção mundial está nas Américas, seguido por 39,2% na Ásia, posteriormente a África com 5,1% e a Oceania com 1,7%. O maior produtor mundial de cana-de-açúcar é o Brasil com 757,12 milhões de toneladas produzidas em 2020, na sequência a Índia com 370,5 milhões de toneladas e em terceiro maior produtor a China com 108,12 milhões de toneladas.

Dentro do território brasileiro, a cana-de-açúcar é uma das principais culturas plantadas. Na safra 2021/2022 foram cultivados 8,318 milhões hectares e produzidas 585,209 milhões de toneladas, conseguindo atingir na média 70,35 toneladas por hectare de produtividade (CONAB, 2022). O maior estado produtor de cana-de-açúcar do Brasil é São Paulo, sendo responsável por mais de 50%

da área plantada e produção. Em média, a produtividade do estado é de 71,6 toneladas por hectare.

Produtores rurais e usinas que cultivam cana-de-açúcar buscam aumentar a produtividade e a longevidade dos canaviais, tentando chegar o mais próximo possível de 100 toneladas por hectare de média. No entanto, existem algumas dificuldades que precisam ser controladas e evitadas, como a susceptibilidade de cultivares a pragas e doença, cultivo em condições de clima desfavorável e práticas de manejo inadequadas. Todos estes fatores podem contribuir para declínio da produtividade da cana-de-açúcar, e umas das principais causas é a presença de falhas em meio as linhas de plantio no decorrer do ciclo do canavial, onde nestes locais não se encontram plantas que poderiam estar produzindo, o que acarreta queda no potencial produtivo (STOLF, 1986).

2.2 Falhas no canavial: as grandes vilãs da produtividade

Falhas no canavial são conhecidas por espaços vazios entre plantas que causam redução na produtividade. A causa das falhas podem ser diversas, começando por um plantio realizado de forma incorreta e em épocas inadequada, onde a escassez hídrica e baixas temperaturas impedem a brotação das gemas. Quando as práticas de manejo são adequadas, os plantios podem atingir apenas 10% de falhas (STOLF, 1986; RODRIGUES & ROSS, 2020). Um grande problema que pode ocasionar morte das soqueiras e, conseqüentemente, gerar as falhas, é o ataque de pragas, principalmente

aquelas presentes no solo, como nematóides, cupins, *Sphenophorus levis* e *Migdolus fryanus* (SANTIAGO & ROSSETTO, 2022; RODRIGUES & ROSS, 2020). Outros fatores também podem ocasionar as falhas, como infestação de plantas daninhas, pisoteio sobre a soqueira da cultura, lâminas de cortes de colhedoras desgastadas, calibração incorreta das colhedoras que podem danificar/abalar as soqueiras (STOLF et al., 2016).

A metodologia desenvolvida por Stolf (1986) determinou por meio de pesquisas que deve considerar falhas, somente lacunas acima de 0,5 metros de comprimento nas linhas de cana-de-açúcar que não apresentam brotação de plantas. Para chegar a esta medida, Stolf realizou diversas repetições com diferentes tamanhos de falhas, onde foi observado que falhas menores que 0,5 metros está presente com grande frequência nos canaviais e não interfere na produtividade. Por outro lado, quando as falhas são maiores que 0,5 metros, os impactos na produtividade são inevitáveis.

A presença de falhas atinge diretamente a produtividade dos canaviais, quando a porcentagem de falhas é de até 55% em um talhão, a perda de produtividade é linear, perdendo a cada 10% de falhas cerca de 3,2% na produtividade (STOLF, 1986). Quando o canavial apresenta acima de 55% de falhas, as plantas que ainda estão na área não conseguem suprir parte da perda de produtividade ocasionada pelas falhas, como citado anteriormente (STOLF, 1986).

2.3 Métodos para mapeamento e identificação de falhas no canavial

O mapeamento de falhas é uma estratégia para manejar os cultivos de cana-de-açúcar e tomar decisões assertivas. Inicialmente, o monitoramento era realizado de forma manual e visual in loco, através da metodologia desenvolvida por Stolf (1986). Neste método era necessário uso de trena, onde selecionava-se uma distância em uma linha de cana-de-açúcar com seus perfilhos estabelecidos. Considerando falhas acima de 0,5 metros, era medido as falhas na distância estabelecida, podendo fazer uma somatória das medidas de cada. Com isso, a relação entre o comprimento total de falhas e o comprimento total do trecho, determina a frequência de falhas. O autor ainda determinou que o número de amostras e a frequência para áreas comerciais deve ser de pelo menos 4 amostras com 20 metros de comprimento por talhão, porém o maior número de frequência aumenta a precisão da metodologia.

Com o advento da agricultura de precisão, o monitoramento de falhas em cana-de-açúcar evoluiu da forma manual para sensor acoplado a trator agrícola através da metodologia de Molin e Veiga (2016). No estudo, os autores acoplaram um sensor fotoelétrico na parte de baixo e frontal de um trator agrícola, interligado com data logger e ecoder na roda dianteira para medir a velocidade. Além disso foi utilizado um receptor GPS para georreferenciamento das falhas e construção de um mapa de falhas por interpolação de dados. Os resultados encontrados pelos autores demonstraram correlação de 99% entre o estimado pelo sensor com o método manual, demonstrando grande eficiência no uso de sensores.

Atualmente vem se observando crescimento no sensoriamento remoto por sensores instalados em aeronaves e satélites, que capturam imagens e dados sem entrar em contato com as plantas, apenas coletando sua reflectância para saber seu comportamento (MOLIN, AMARAL & COLAÇO, 2015). Em estudos realizados por Luna e Lobo (2016), Souza et al. (2017) e Barbosa Júnior (2021), os autores abordaram um novo método para o monitoramento de falhas em cana-de-açúcar, utilizando sensoriamento remoto através de VANT's. Para os estudos, foram coletadas imagens aéreas, processadas em softwares e identificadas as falhas através de plataformas de processamento, os resultados foram comparados com o observados em campo coletados de forma manual. Quando realizado o imageamento em condições adequadas e momento correto de desenvolvimento da cultura para o monitoramento das falhas utilizando VANT, todos os autores obtiveram R^2 acima de 0,9. Com isso os resultados demonstraram grande eficiência do uso de VANT's, devido grande precisão para identificação e extrema eficiência, principalmente em áreas extensas, podendo ser atribuídas ações de replantio, reforma do canavial e até mesmo decisões localizadas na falha, como por exemplo, evitar aplicações de fertilizantes em locais sem a presença de plantas (CORRÊA, 2021).

2.4 Mapeamento com VANT-RTK: uma alternativa para ações localizadas

As lavouras apresentam grande variabilidade espacial entre as plantas dentro de uma mesma gleba de cultivo, sendo ainda mais expressiva em áreas de grandes extensões (ALVES, 2014; MOLIN, AMARAL & COLAÇO, 2015). Este

fator presente dentro do mesmo campo é devido as diferenças de solo, nutrição, relevo, entre outros fatores que podem interferir o desenvolvimento das plantas (MOLIN, AMARAL & COLAÇO, 2015). Observando as variabilidades e tendo a necessidade de mapeá-las, a agricultura de precisão surgiu como uma ferramenta eficaz, que possibilita saber o que está ocorrendo, local e o estado que se encontra a lavoura, de forma precisa e eficaz (ALVEZ, 2014; MOLIN, AMARAL & COLAÇO, 2015; MOLIN & ANSELM, 2015).

Visto a demanda para mapear a variabilidade espacial das lavouras, os VANT's com sensores embarcados para capturar imagens aéreas tornaram-se uma grande ferramenta. Os VANT's proporcionam imagem com maior resolução comparado com imagens de satélites, com isso podem obter mais características do alvo a ser estudado. É possível observar e monitorar com imagens aéreas o ataque de doenças, pragas, avaliar estado nutricional das plantas, contagem de plantas, mapear falhas e plantas daninhas, estimar biomassa das plantas, mensurar a produtividade e avaliar a topografia do terreno, sem a necessidade de adentrar a lavoura, realizando de forma rápida e eficiente (CARRE et al., 2022; FORLANI et al., 2018; ASLAN et al., 2022; CHERUBIN et al., 2022; BARBOSA JÚNIO et al., 2021). No entanto, para mapeamentos que necessitam de grande precisão no georreferenciamento de imagens, como construção de mapas de aplicação em taxa variável ou localizada, replantio de falhas e desligamento de seção em locais que não tem a presença de plantas, o uso de VANT's comuns não apresenta grande eficácia, devido ao sistema de GPS embarcado ser GNSS de navegação, que teria erro no posicionamento cerca de

5 metros (CARRE et al., 2022; CORRÊA, 2021; REN et al., 2022; GILLIOT, HADJAR & MICHELIN, 2022; CHERUBIN et al., 2022).

Uma das opções para utilizar VANT's é ter resultados preciso é a adoção de pontos de controle. Esta metodologia consiste em demarcar pontos no solo, geralmente nos vértices da área a ser mapeada e que possam ser vistos nitidamente na imagem aérea, estes pontos são georreferenciados com uso de uma base RTK (Real Time Kinematic) (BARRY & COOKLEY, 2013; GILLIOT, HADJAR & MICHELIN, 2022; STRONER et al., 2020). No processamento de imagens, estes pontos são identificados pela sua coordenada, desta forma as coordenadas das imagens são corrigidas e assim gerando uma imagem com erros centimétricos (BARRY & COOKLEY, 2013; GILLIOT, HADJAR & MICHELIN, 2022, STRONER et al., 2020). A desvantagem deste sistema é a necessidade de fazer pontos de controle pela área e o processamento de imagem, o que demanda maior tempo e custo. Diante disso a opção atual para mapeamento aéreo, é utilizar VANT's com sistema RTK embarcados, onde se tem uma base fixa receptora de sinal via satélite que se comunica via rádio com o receptor GNSS do VANT, dessa forma as imagens coletas apresentam grande acurácia e precisão (FORLANI et al., 2018; REN et al., 2022; GILLIOT, HADJAR & MICHELIN, 2022; STRONER et al., 2020; MASNY, WEIS & BISKUPIC, 2021; TOMASTEUK et al., 2019). No entanto, ainda existem lacunas quanto a fidelidade do mapeamento usando este tipo de dispositivo. Assim, necessitando de mais pesquisas aplicadas para resolver estes problemas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Ambiente de estudo

O estudo foi realizado em cinco campos de cana-de-açúcar no interior do estado de São Paulo, Brasil. As condições climáticas e o tipo de solo eram semelhantes para todos os campos: Aw clima com Inverno seco, temperatura média de 23 °C e precipitação de 1400 mm (ALVARES et al., 2013); e solo do tipo LATOSSOLO VERMELHO Distroférico típico, com textura argilosa e baixa declividade (ROSSI, 2017). Os campos de estudo foram cultivados com cultivares de cana-de-açúcar e para se enquadrarem no nosso primeiro objetivo, tinham plantas de diferentes alturas. Na Tabela 1 são fornecidas informações detalhadas sobre os campos de estudo e cultivares utilizadas.

Tabela 1. Informações dos cultivos das cultivares de cana-de-açúcar analisadas no estudo.

ID do campo	Cultivar	Soqueira	Data de colheita	Produtividade (t ha ⁻¹)
NEI-16	CTC 9005	4º	15/04/2022	100
TIJ-03	RB 85-5156	4º	15/04/2022	85
MTA-11	IAC SP 91-1099	2º	15/05/2022	80
FSI-46	CTC 2994	1º	15/06/2022	120
FMB-01	RB 85-5156	5º	03/07/2022	95

3.2 Medições em campo

Foram medidas 25 falhas igualmente distribuídas em cinco linhas de cultivo em cada um dos campos de cana-de-açúcar (Tabela 1). As falhas

medidas foram escolhidas aleatoriamente dentro da linha de cultivo, considerando a dimensão mínima de 0,50 m (STOLF, 1986). Todas as falhas no campo foram individualmente identificadas por um marcador (Figura 1) para posterior comparação com as falhas medidas pelas imagens. Além disso, para caracterizar os campos, foi medido a altura de 20 plantas distribuídas aleatoriamente no campo.

3.3 Missões de voo

Foi utilizado um VANT multirrotor para capturar as imagens (DJI Phantom 4 Multispectral RTK, Shenzhen, China). O VANT tem uma câmera a bordo fixada por gimbal de 3 eixos. A câmera tem distância focal de 5,74 mm, tamanho de imagem de 1600 x 1300 pixels e tamanho de sensor de 4,87 x 3,69 mm. A câmera possui seis sensores de imagem, incluindo cinco sensores multiespectrais e um sensor RGB. No estudo utilizou apenas as imagens RGB. Este VANT é equipado com um receptor GNSS multifrequência (DJI D-RTK2, Shenzhen, China) capaz de receber sinais GPS, GLONASS, BeiDou e Galileo. O receptor assegura precisão horizontal de 1,0 cm e vertical de 1,5 cm. A missão de voo foi realizada automaticamente por aplicativo (DJI GS Pro, Shenzhen, China) em 05 de Agosto de 2022. As imagens foram capturadas com gimbal em ângulo de - 90°, sobreposição de imagem de 70% lateral e frontal, velocidade de voo de 7 m/s e altura de voo de 70 m. Em cada campo realizou-se dois voos, um voo com conexão RTK e o outro sem conexão RTK, para analisar os impactos

da acurácia posicional no mapeamento das falhas em cana-de-açúcar. Os dados do VANT e as especificações de voo são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Especificações e configurações dos voos.

ID do campo	Sistema GNSS	Hora do voo	Número de imagens	GSD (cm)
FSI-46	RTK	08:52 – 08:59	63	4,15
	não-RTK	09:01 – 09:07	63	4,08
NEI-16	RTK	09:35 – 09:39	41	3,72
	não-RTK	09:40 – 09:44	41	3,78
FMB-01	RTK	10:20 – 10:25	66	3,68
	não-RTK	10:28 – 10:32	66	3,73
MTA-11	RTK	10:56 – 11:00	41	3,68
	não-RTK	11:02 – 11:06	41	3,80
TIJ-03	RTK	13:50 – 13:54	40	3,77
	não-RTK	13:55 – 14:00	40	3,90

3.4 Processamento dos dados fotogramétricos

Para corrigir erros de oclusão e distorções, as imagens foram processadas utilizando software baseado em *Structure from Motion* (SfM) (Agisoft Metashape Professional 1.5.5, Agisoft, St. Petersburg, Russo). O principal produto gerado pelo processamento SfM é o ortomosaico, que, além de conter as dimensões reais dos objetos, é também representado em um sistema de coordenadas geográficas. No estudo, obteve-se 10 conjuntos de imagens (5 RTK e 5 não-RTK). Ambos os conjuntos de imagens foram processados utilizando os mesmos parâmetros (Tabela 3).

Tabela 3. Configurações usadas para processar as imagens no Agisoft Metashape.

	Setting	Value
Align Photos	Accuracy	High
	Key point limit	40,000
	Tie point limit	4,000
DEM	Projection	Geographic
	Coordinate system	WGS 84 / UTM zone 22S (EPSG::32722)
	Souce data	Sparse cloud
	Interpolation	Enable (default)
Orthomosaic	Surface	DEM
	Blending mode	Mosaic (default)
	Enable hole filing	✓

(Configurações não detalhadas acima foram mantidas padrão).

3.5 Medição das falhas pelas imagens

Quando os ortomosaicos foram gerados, o passo seguinte foi medir as falhas através das imagens. Para esta tarefa utilizou o pacote de código aberto “FIELDimageR” (MATIAS; CARAZA-HARTER; ENDELMAN, 2020) na linguagem de programação Rstudio. O passo a passo para medir as falhas é ilustrado na Figura 1 e descrito abaixo:

- i) Entrada com a imagem: corte da região de cada falha e formação do conjunto de dados para analisar cada falha independentemente.
- ii) Definindo planta e solo: em cada imagem de falha aplicou-se o Índice Visível de Resistência Ambiental (VARI) para diferenciar entre solo e planta.
- iii) Segmentação: atribuição do valor $VARI = -0,12$. As regiões de imagem com valores superiores a $-0,12$ representavam as plantas,

enquanto os valores inferiores representavam o solo e foram automaticamente removidos.

- iv) Linha de medição da falha: clicar no centro de massa das plantas (01 e 02) para formar uma linha de medição.
- v) Comprimento da falha: o algoritmo é programado para remover a parte da linha sobre as plantas, permanecendo apenas a linha sobre a falha. Como a imagem é representada geograficamente, o comprimento da linha descreve corretamente o comprimento visível da falha.

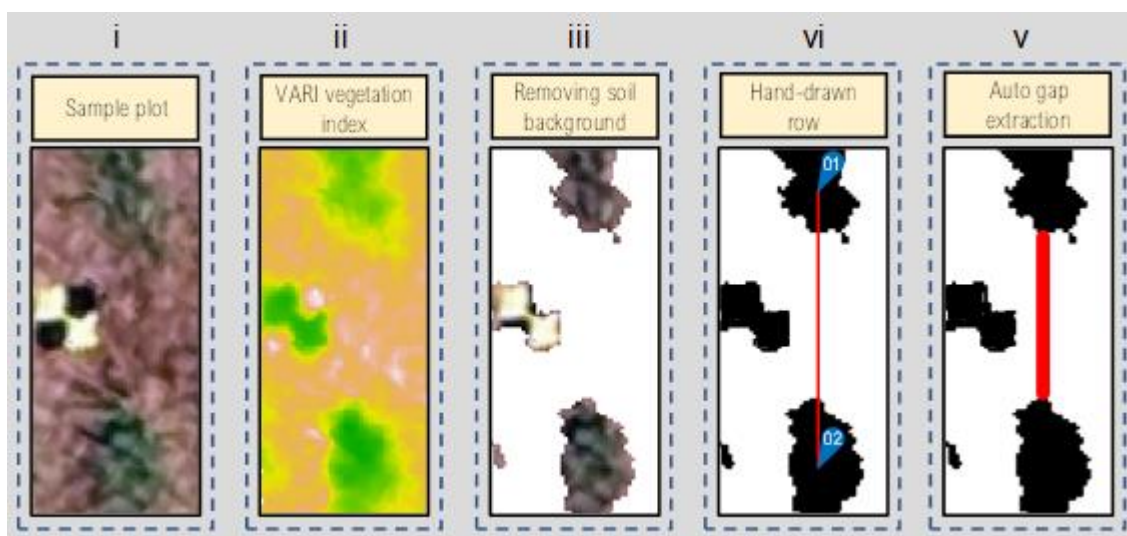


Figura 1. Passo a passo para medir o comprimento das falhas por imagens.

3.6 Validação dos dados

Em primeiro lugar, plotou-se os comprimentos das falhas medidas por imagens e comparou com as falhas medidas no campo. Nesta estratégia, obteve-se a capacidade de analisar os impactos da medição das falhas em função da altura das plantas e sob o sistema GNSS utilizado. Utilizamos métricas

como o coeficiente de determinação (R^2) e o erro médio absoluto percentual (MAPE). Em segundo lugar, avaliou a comparação do erro médio de localização da imagem entre voos RTK e voos não-RTK que foi fornecido pelo software SfM utilizado neste estudo.

4 RESULTADOS

4.1 Caracterização da altura de plantas

Os campos de estudo foram caracterizados pela altura das plantas (Figura 2). No primeiro campo (FMB-01), as plantas tinham altura média de 0,35 m, o que é típico na fase de brotação. Embora as medições terem sido efetuadas aproximadamente 30 dias após a colheita, devido às condições climáticas (falta de chuva regular e temperaturas elevadas) as plantas ainda eram pequenas. No segundo campo (FSI-46) as plantas eram ligeiramente maiores do que no primeiro (0,44 m), mas ainda na fase de brotação. Plantas mais altas foram realmente encontradas nos campos com mais de 60 dias após a colheita. No campo MTA-11 as plantas estavam em fase de perfilhamento, com altura média de 0,66 m. Quanto ao campo TJI-03, as plantas estavam dirigindo-se para a fase de alongamento e a altura média aumentou para 0,95 m e o campo NEI-16 foi nosso campo com as plantas mais altas (1,07 m). Notamos claramente pouca variação dentro da coleta de dados sobre altura de cada planta, por isso foi representado os campos de estudo com base nos valores médios da altura das plantas.

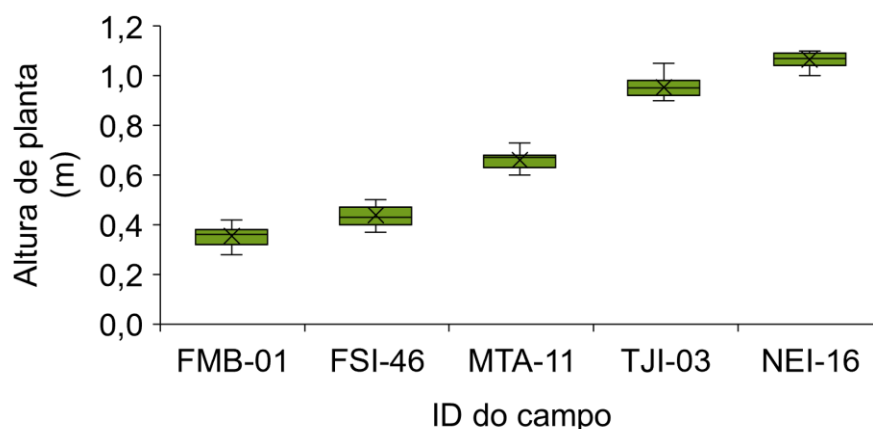


Figura 2. Distribuição de altura de planta por campo de cana-de-açúcar. Cada Caixa foi construída com 20 valores de altura de planta e representa um campo.

4.2 Medição das falhas

As falhas medidas em campo foram comparadas com as falhas medidas por imagens capturadas nos sistemas RTK e não-RTK (Figura 3). Analisando as falhas medidas em comparação com os sistemas GNSS utilizados, podemos notar que independentemente do sistema ser RTK ou não-RTK, os resultados foram muito semelhantes nos cinco campos de estudo. As métricas de precisão e acurácia provaram ser úteis na explicação desta abordagem proposta. Em média, os sistemas GNSS diferiram em menos de 2%, tanto em precisão como em acurácia. Em contraste, o elemento-chave que teve impacto nos resultados foi, sem dúvidas, a altura da planta.

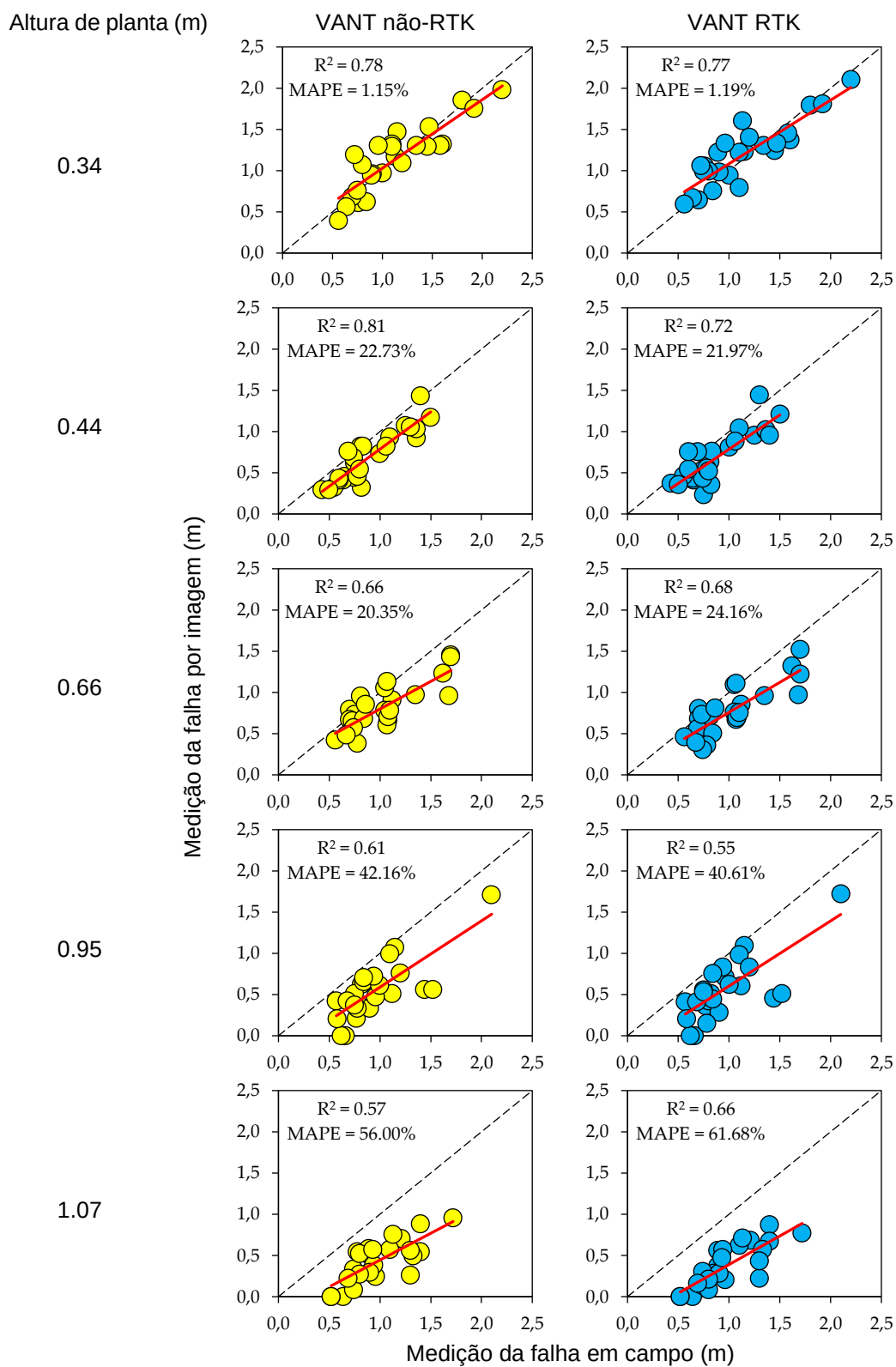


Figura 3. Comparação do comprimento das falhas medidos em campo e por imagens. A comparação inclui os sistemas não-RTK e RTK em diferentes condições de altura de planta.

Quando a altura das plantas era de 0,36 m, conseguimos o nosso melhor resultado numa combinação de precisão e acurácia $R^2 = 0,78$ e $MAPE = 1,15\%$, respectivamente. Quando as plantas eram ligeiramente mais altas (0,44 m), a precisão dos resultados permaneceu alta, contudo, a acurácia diminuiu em mais de 20%. O ajuste dos resultados manteve o padrão para as outras alturas de plantas, até atingir a mais baixa precisão e acurácia ($R^2 = 0,57$ e $MAPE = 61,68\%$) quando as plantas eram mais altas (1,07 m). Analisando criticamente os resultados, pode-se observar poucos valores superestimados nas falhas medidas pelas imagens, possivelmente quando as plantas eram menores foi quando os valores foram superestimados. Em geral, o aumento da altura das plantas permitiu subestimar as falhas medidas pelas imagens até ao ponto em que algumas falhas menores do que 0,70 m já não fossem mais identificadas, tornando impossível a utilização de imagens de VANT nesta estratégia de mapeamento.

4.3 Erros dos sistemas GNSS

Até agora os sistemas RTK e não-RTK aplicados ao mapeamento de falhas por imagens VANT mostraram resultados semelhantes e, portanto, ambos os sistemas poderiam ser utilizados para medir o comprimento das falhas em campo. Contudo, analisando os resultados relativos ao posicionamento geográfico das imagens capturadas pelos dois sistemas, podemos notar diferenças significativas (Figura 4). Quando os voos foram realizados com sistema RTK, os erros foram de alguns milímetros. Em média, os erros

planimétricos (X e Y) foram de 0,22 mm, contudo, os erros altimétricos foram maiores (Z = 3,25 mm). Por outro lado, ao utilizar sistemas não-RTK, os erros pertenciam à escala de centímetros. Os erros de localização das imagens em X, Y e Z eram constantes, em média, os valores de erro eram de 8,59 cm. Comparando a precisão dos voos com RTK, as variações na localização da imagem entre os cinco voos foram de 3,2% para X, 5,9% para Y, e 34,5% para Z. Em contraste, o sistema não-RTK provou ser instável para a aquisição de imagens georreferenciadas. Em X as variações atingiram 53,3%, em Y 64,5% e em Z atingimos 279% de variação. Notavelmente, a utilização do sistema não-RTK seria um problema para a tomada de decisões na localização da falha e consequentemente determinação de replantio ou de gestão de ações específicas do local.

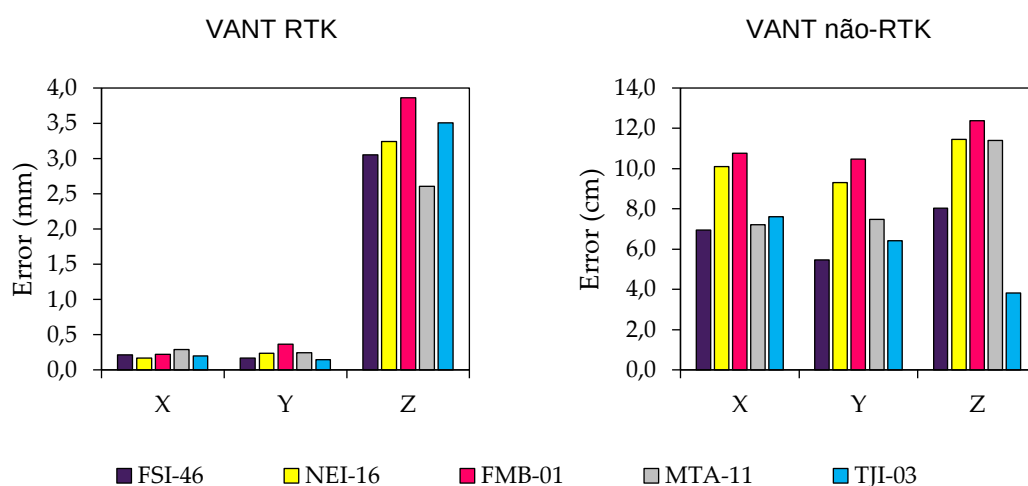


Figure 4. Erro médio na localização das imagens. X – Longitude, Y – Latitude, Z – Altitude.

5 DISCUSSÃO

Neste estudo utilizou imagens VANT para mapear falhas em cana-de-açúcar em cinco campos e analisou os efeitos da operação de voo com sistema RTK e não-RTK. Estudos anteriores trouxeram resultados consistentes quanto às aplicações de VANT no mapeamento de falhas em cana-de-açúcar. No entanto, até então não sabíamos os impactos se usássemos VANT com sistema RTK para captura das imagens. Portanto, neste estudo conseguimos trazer resultados sólidos e até que ponto o GNSS do VANT pode interferir no mapeamento de falhas em cana-de-açúcar.

5.1 Mapeamento de falhas em cana-de-açúcar: devemos usar RTK?

Mapear falhas em campos de cana-de-açúcar é uma prática inteligente para melhor compreender o status da lavoura. Inicialmente, os agricultores concentraram-se na identificação de falhas para tomar decisões sobre possíveis renovações dos campos de cana-de-açúcar. Mais recentemente, práticas de replantio e aplicações específicas do local, para evitar o desperdício de insumos através da aplicação onde não existem plantas, também se tornaram realidade. Desde a introdução dos VANT, o mapeamento de falhas tornou-se um dos tópicos mais ativos quando se trata de cana-de-açúcar (BARBOSA JÚNIOR et al., 2022). Os VANT têm sido a principal plataforma para o mapeamento de falhas e alguns estudos exploraram de diferentes maneiras como a plataforma pode mapear com precisão as falhas nos campos de cana-de-açúcar.

Os principais estudos de mapeamento de falhas aplicaram técnicas de análise discriminante (LUNA; LOBO, 2016), análise baseada em objeto (SOUZA et al., 2017), e combinação entre alturas de voo e fenologia da planta (BARBOSA JÚNIOR et al., 2021). Os resultados foram capazes de resolver parte dos problemas de mapeamento de falhas, mesmo que apenas de forma limitada. No entanto, se quisermos abordar as promessas de mapeamento de falhas implementadas pelos próprios autores, tais como replantio e/ou aplicação localizada de insumos, os resultados existentes até agora não são suficientes.

Em primeiro lugar, neste estudo realizou-se voos com VANT com sistemas RTK e não-RTK para mapear falhas em campos de cana-de-açúcar com diferentes alturas de plantas. Como visto nos resultados, a altura das plantas foi um parâmetro determinante na precisão do mapeamento das falhas. Notavelmente, o campo com plantas menores (0,34 m) retornou resultados mais precisos e acurados. Mas curiosamente, o campo com maiores valores superestimados. Cerca de 50% das falhas medidas por imagem tinham valores mais elevados do que as falhas reais, tanto quando medidas utilizando sistemas RTK como não-RTK. Quando o campo de cana de açúcar ainda está em fase de brotação, pilotar um VANT para mapear falhas é uma prática arriscada e pouco confiável. Quando as plantas são muito pequenas, os desafios para diferenciar entre planta e solo e subsequentemente medir as falhas são muito maiores, neste caso, devemos investir em sensores de ultra resolução para capturar as imagens, o que é caro. Mais importante ainda, no período de brotação ainda não surgiram todos os brotos e a estimativa não é bem-sucedida, mascarando os resultados.

Quando a cultura atinge a fase de perfilhamento (plantas com cerca de 0,5 m de altura), a precisão e acurácia do mapeamento começa a enfraquecer rapidamente devido ao desenvolvimento da copa das folhas e à cobertura consecutiva das falhas pelas folhas (BARBOSA JÚNIOR et al., 2021). No entanto, não teríamos qualquer problema com possíveis brotos a vir, portanto aqui deve ser o momento para mapear falhas em cana-de-açúcar confiavelmente. À medida que a cultura se aproximava da fase de alongamento, as nossas métricas mostravam baixa confiabilidade dos dados e que o mapeamento de falhas se tornava uma tarefa crítica.

Nossos resultados mostraram que as imagens capturadas pelo VANT com sistemas RTK e não-RTK aplicados ao mapeamento das falhas em cana-de-açúcar podiam medir o comprimento das falhas de forma semelhante. Estas descobertas são importantes e abririam uma porta para aplicação do VANT com sistema GNSS de baixo custo no mapeamento de falhas em cana-de-açúcar, embora uma aplicação restrita. Devido à baixa altitude da missão de voo do VANT, uma única imagem não é suficiente para cobrir toda a área de interesse, portanto são utilizadas técnicas de voo para capturar múltiplas imagens sobrepostas, unindo-as em uma única (ortomosáico) por reconstrução fotogramétrica. (GILLIOT; HADJAR; MICHELIN, 2022). O principal requisito é que as imagens tenham pontos homólogos, ou seja, múltiplas imagens tenham capturado o mesmo objeto, mas tenham também uma posição geográfica, de modo a que seja possível apresentá-lo num plano geográfico (GILLIOT; HADJAR; MICHELIN, 2022). Até onde sabemos, não era conhecido especificamente se a reconstrução fotogramétrica era influenciada pelo tipo de

GNSS a bordo da aeronave. No entanto, os resultados mostram que o GNSS aparentemente não é um problema.

A avaliação dos erros médios de localização das imagens é a única medida de precisão quando não são utilizados pontos de controle (GCP) (MASNÝ; WEIS; BISKUPIČ, 2021). No estudo, ao utilizar o VANT RTK, os resultados foram consistentes e os erros foram milimétricos, com pouca variação. Por outro lado, ao utilizar o sistema não-RTK, os dados eram altamente instáveis, atingindo variação incrível na localização das imagens. Assim, já poderia concluir que a utilização do VANT RTK seria a melhor opção. Uma curiosidade comum nos dois sistemas GNSS era que os erros verticais eram maiores para ambos, em comparação com os erros horizontais. Em estudos anteriores, os pesquisadores investigaram a precisão das imagens de georreferenciação adquiridas pelos VANT RTK e observaram também que a precisão vertical era menor para ambos os sistemas (BENASSI et al., 2017; FORLANI et al., 2019; ŠTRONER et al., 2020). Em resumo, os autores justificaram este fato com possíveis erros de cálculo dos parâmetros internos da câmara no processo de autocalibração, o que seria um problema recorrente em câmaras não métricas (ŠTRONER et al., 2020).

6 CONCLUSÕES

Os resultados demonstraram que a altura de plantas pode interferir no mapeamento de falhas em cana-de-açúcar utilizando VANT, havendo a necessidade de se realizar o mapeamento no momento exato de desenvolvimento da cultura, para que não se possa superestimar os resultados de falhas quando plantas muito baixas ou subestimar quando plantas muito altas.

A utilização de RTK ou somente GNSS para o mapeamento não interferiu na identificação e comprimento das falhas, porém, o RTK apresentou maior precisão e acurácia quanto a localização geográfica das falhas. Portanto a utilização de RTK torna-se indispensável quando se encontra a necessidade de mapear as falhas com precisão na sua localização.

LITERATURA CITADA

- ALCARDE, A. R. Cana: geração de energia elétrica. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/processamento-da-cana-de-acucar/geracao-de-energia-eletrica>. Acesso em: 29 nov. 2022.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, p. 711–728, 2013.
- ALVES, E. A. Variabilidade espacial da qualidade de culturas agrícolas. In: Embrapa Rondônia-Artigo em anais de congresso (ALICE). In: REUNIÃO DE CIÊNCIA DO SOLO DA AMAZÔNIA OCIDENTAL, 2., 2014, Porto Velho. Manejo dos solos e a sustentabilidade da produção agrícola na Amazônia Ocidental: anais. Porto Velho: SBCS, 2014., 2014.
- AMARAL, A. L.; DOS SANTOS, J. M.; BARBOSA, G. V. S. Denominação de Cultivares de Cana-de-Açúcar como Suporte à Documentação e Utilização do Germoplasma Conservado. Embrapa Tabuleiros Costeiros-Documents (INFOTECA-E), 2015.
- ASLAN, M. F. et al. A comprehensive survey of the recent studies with VANT for precision agriculture in open fields and greenhouses. *Applied Sciences*, v. 12, n. 3, p. 1047, 2022.
- BARBOSA JÚNIOR, M. R.; MOREIRA, B. R. de A.; BRITO FILHO, A. L. De; TEDESCO, D.; SHIRATSUCHI, L. S.; SILVA, R. P. Da. UAVs to Monitor and Manage Sugarcane: Integrative Review. *Agronomy*, v. 12, p. 661, 2022.
- BARBOSA JÚNIOR, M. R.; TEDESCO, D.; CORRÊA, R. G.; MOREIRA, B. R. A.; SILVA, R. P.; ZERBATO, C. Mapping Gaps in Sugarcane by UAV RGB Imagery: The Lower and Earlier the Flight, the More Accurate. *Agronomy*, v. 11, p. 2578, 2021.
- BARRY, P.; COAKLEY, R.. Accuracy of UAV photogrammetry compared with network RTK GPS. *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens*, v. 2, p. 2731, 2013.
- BENASSI, F.; DALL'ASTA, E.; DIOTRI, F.; FORLANI, G.; CELLA, U. M. Di; RONCELLA, R.; SANTISE, M. Testing accuracy and repeatability of UAV blocks oriented with gnss-supported aerial triangulation. *Remote Sensing*, v. 9, p. 1–23, 2017.
- CARRER, M. J. et al. Precision agriculture adoption and technical efficiency: An analysis of sugarcane farms in Brazil. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 177, p. 121510, 2022.
- CHERUBIN, M. R. et al. Precision Agriculture in Brazil: The Trajectory of 25 Years of Scientific Research. *Agriculture*, v. 12, n. 11, p. 1882, 2022.
- CONAB. Produção Agrícola: safra - série histórica da cana-de-açúcar. 2022. Disponível em: <https://portaldeinformacoes.conab.gov.br/safra-serie-historica-cana-de-acucar.html>. Acesso em: 29 nov. 2022.

FAO. Crops and livestock products. 2020. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>. Acesso em: 29 nov. 2022.

FORLANI, G.; DIOTRI, F.; DI CELLA, U. M.; RONCELLA, R. Indirect UAV strip georeferencing by on-board GNSS data under poor satellite coverage. *Remote Sensing*, v. 11, 2019.

FORLANI, G. et al. Quality assessment of DSMs produced from UAV flights georeferenced with on-board RTK positioning. *Remote Sensing*, v. 10, n. 2, p. 311, 2018.

GILLIOT, J. M.; HADJAR, D.; MICHELIN, J. Potential of Ultra-High-Resolution UAV Images with Centimeter GNSS Positioning for Plant Scale Crop Monitoring. *Remote Sensing*, v. 14, p. 2391, 2022.

HAN, S. Y.; BISHOP, T.; FILIPPI, P. Data-driven, early-season forecasts of block sugarcane yield for precision agriculture. *Field Crops Research*, v. 276, p. 108360, 2022.

LUNA, I.; LOBO, A. Mapping Crop Planting Quality in Sugarcane from UAV Imagery: A Pilot Study in Nicaragua. *Remote Sensing*, v. 8, p. 500, 2016.

MASNÝ, M.; WEIS, K.; BISKUPIČ, M. Application of fixed-wing uav-based photogrammetry data for snow depth mapping in alpine conditions. *Drones*, v. 5, 2021.

MATIAS, F. I.; CARAZA-HARTER, M. V.; ENDELMAN, J. B. FIELDimageR: An R package to analyze orthomosaic images from agricultural field trials. *The Plant Phenome Journal*, v. 3, p. 1–6, 2020.

MATSUOKA, S.; STOLF, R. Sugarcane tillering and ratooning: key factors for a profitable cropping. In: *Sugarcane: Production, Cultivation and Uses*. [s.l: s.n.]. p. 138–157.

MOLIN, J. P.; VEIGA, J. P. S. Spatial variability of sugarcane row gaps: Measurement and mapping. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 40, p. 347–355, 2016.

MOLIN, J. P.; ANSELM, A. A.. Agricultura de precisão considera variabilidade das áreas de cultivo. *Visão Agrícola*, v. 13, 2015.

MOLIN, J. P.; DO AMARAL, L. R.; COLAÇO, A. Agricultura de precisão. *Oficina de textos*, 2015.

RAPER, R. L. Agricultural traffic impacts on soil. *Journal of Terramechanics*, v. 42, p. 259–280, 2005.

REN, X. et al. An AR Geo-Registration Algorithm for UAV TIR Video Streams Based on Dual-Antenna RTK-GPS. *Remote Sensing*, v. 14, n. 9, p. 2205, 2022.

RODRIGUES, G. S. de S. C.; ROSS, J. L. S. A trajetória da cana-de-açúcar no Brasil: perspectivas geográfica, histórica e ambiental. *Edufu*, 2020.

ROSSI, M. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. v. 1

SAKAI, R. H. Cana: cachaça. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/cachaca>. Acesso em: 29 nov. 2022.

SANTIAGO, A. D.; ROSSETTO, R. Cana: pragas nas raízes. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/manejo/fitossanidade/pragas/pragas-nas-raizes>. Acesso em: 29 nov. 2022.

SANTOS, F.; BORÉM, A. (ed.). Cana-de-açúcar: do plantio a colheita. Viçosa: Ufv, 2016. 290 p.

SANTOS, M. A. L.; SILVA, S.; ZOCOLER, J. L.; TEODORO, I.; DANTAS NETO, J.; SOUSA, J. da S. Avaliação de falhas na brotação da cana-de-açúcar em função da disponibilidade hídrica. Agropecuária científica no semiárido, p. 30–35, 2013.

SOUZA, C. H. W.; LAMPARELLI, R. A. C.; ROCHA, J. V.; MAGALHÃES, P. S. G. Mapping skips in sugarcane fields using object-based analysis of unmanned aerial vehicle (UAV) images. Computers and Electronics in Agriculture, v. 143, p. 49–56, 2017.

STOLF, R. et al. Avaliação de falhas em cana-de-açúcar segundo método de Stolf utilizando imagens aéreas de alta precisão obtidas por VANT. Revista STAB, v. 34, p. 32-39, 2016.

STOLF, R. Methodology for gap evaluation on sugarcane lines. STAB, v. 4, p. 12–20, 1986.

STOLF, R. Transplante de soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) como técnica de renovação da cultura. Piracicaba, 1983. 119p. Tese - ESALQ/USP.

STOLF, R., IAIA, A.M., LEE, T.S.G. Índice de falhas segundo o método de STOLF: correlação com o rendimento agrícola em cana-planta. Brasil Açucareiro, Rio de Janeiro, v.104, n.5,6, p.44-50, 1986.

STOLF, R., IAIA, A.M., LEE, T.S.G. Índice de falhas segundo o método de STOLF: correlação com o rendimento agrícola em soqueiras de cana-de-açúcar. Álcool e Açúcar, São Paulo, v.11, n.58, p.12-16, maio/jun.1991.

ŠTRONER, M.; URBAN, R.; REINDL, T.; SEIDL, J.; BROUČEK, J. Evaluation of the georeferencing accuracy of a photogrammetric model using a quadrocopter with onboard GNSS RTK. Sensors (Switzerland), v. 20, 2020.

TOMAŠTÍK, J. et al. UAV RTK/PPK method—an optimal solution for mapping inaccessible forested areas?. Remote sensing, v. 11, n. 6, p. 721, 2019.

VIAN, C. E. F. Cana: pós-produção. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao>. Acesso em: 29 nov. 2022.

ZHAO, P.; GUO, J.; GAO, X.; LIU, G.; LI, Y.; BURNER, D. M.; YANG, L. Small-scale mechanical harvesting and tractor-caused soil compaction reduce early growth in sugarcane. Agronomy, v. 9, p. 830, 2019.