

MARCELO FAGUNDES PORTES

**SENSORIAMENTO REMOTO TERMAL USANDO VEÍCULO AÉREO NÃO-
TRIPULADO NA CAFEICULTURA DE MONTANHA**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Agrícola, para obtenção do título de
Magister Scientiae.

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

P849s
2018

Portes, Marcelo Fagundes, 1987-
Sensoriamento remoto termal usando veículo aéreo
não-tripulado na cafeicultura de montanha / Marcelo Fagundes
Portes. – Viçosa, MG, 2018.
xi, 56 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Daniel Marçal de Queiroz.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.
Referências bibliográficas: f. 50-56.

1. Agricultura de precisão . 2. Termômetros e termometria.
3. Drone. 4. Café - Cultivo. I. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

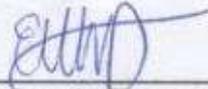
CDD 22. ed. 631.3

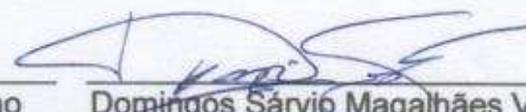
MARCELO FAGUNDES PORTES

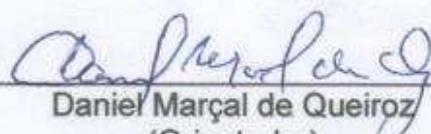
SENSORIAMENTO REMOTO TERMAL USANDO VEÍCULO AÉREO NÃO-TRIPULADO NA CAFEICULTURA DE MONTANHA

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 23 de agosto de 2018.


Elpidio Inacio Fernandes Filho


Domingos Sárvio Magalhães Valente
(Coorientador)


Daniel Marçal de Queiroz
(Orientador)

Aos meus pais Fátima e Alcenir,
Pelo amor, confiança e apoio em
toda minha trajetória até aqui.

DEDICO

“*Que* homem é o homem que
não torna o mundo melhor?”
(Kingdom of Heaven)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ter proporcionado as conquistas em minha vida.

A Universidade Federal de Viçosa, principalmente ao Departamento de Engenharia Agrícola por ter me proporcionado os ensinamentos que levo como Engenheiro Agrícola e Ambiental.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) pela concessão da bolsa de estudo e apoio financeiro para realização desta pesquisa.

Aos professores Francisco de Assis de Carvalho Pinto, Domingos Sárvio Magalhães Valente e em especial ao Daniel Marçal de Queiroz pela excelente orientação, ensinamentos, apoio, confiança e amizade durante todo o desenvolvimento do trabalho.

Ao Afonso pela cordialidade em oferecer a Fazenda Braúna nas pesquisa e coleta de dados.

Ao meu grande amigo Gabriel Abrahão pelas várias “consultorias” e ajuda em meu mestrado.

A minha companheira Izabela pelo amor e carinho incondicional, tornando minha caminhada muito mais agradável, sempre apoiando e motivando nos momentos difíceis.

Aos secretários do curso de graduação do departamento de Engenharia Agrícola e da pós-graduação em Engenharia Agrícola pelo atendimento sempre que necessário.

Ao professor Elder pelas conversas e ajuda nas coletas dos dados.

Aos meus companheiros de Laboratório de Mecanização Agrícola (LMA), Emanuel, Amélia, Samira e André pela ajuda na coleta dos dados e elaboração do trabalho.

A todos colegas do Laboratório de Mecanização Agrícola (LMA) pela agradável convivência e descontração durante a realização do mestrado.

A toda minha família e amigos que sempre fizeram presentes em minha vida.

SUMÁRIO

| | |
|---|-----|
| LISTA DE TABELAS..... | vi |
| LISTA DE FIGURAS..... | vii |
| RESUMO | ix |
| ABSTRACT..... | xi |
| 1. INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA..... | 4 |
| 2.1. Cafeicultura Brasileira..... | 4 |
| 2.2. Agricultura de Precisão..... | 5 |
| 2.2.1. Delineamento de Zonas de Manejo em Agricultura de Precisão..... | 6 |
| 2.3. Sensoriamento Remoto em Agricultura de Precisão..... | 7 |
| 2.3.1. Sensoriamento Remoto de Baixa Altitude..... | 8 |
| 2.3.2. Sensoriamento Remoto Termal..... | 9 |
| 2.4. Veículos Aéreos Não-Tripulados..... | 9 |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS..... | 12 |
| 3.1. Área de estudo..... | 12 |
| 3.2. Veículo aéreo não-tripulado utilizado..... | 12 |
| 3.3. Câmera termal e sistema de aquisição de fotos aéreas..... | 15 |
| 3.4. Plano de Voo, coleta de temperatura, umidade local e georreferenciamento..... | 16 |
| 3.5. Aquisição das imagens aéreas..... | 19 |
| 3.6. Processamento das imagens termais obtidas a partir do VANT..... | 19 |
| 3.7. Geração dos mapas termais..... | 21 |
| 3.8. Determinação do melhor horário de voo para o imageamento termal..... | 22 |
| 3.9. Geração do modelo digital de elevação e do mapa de umidade do solo..... | 22 |
| 3.10. Geração de zonas de manejo a partir de mapas termais, mapas de umidade do solo e MDE..... | 23 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO..... | 24 |
| 4.1. Características do VANT e sistema de disparo das imagens..... | 24 |
| 4.2. Processamento dos dados coletados em solo..... | 25 |

| | |
|--|----|
| 4.3. Processamento das imagens obtidas pelo VANT | 30 |
| 4.4. Modelo Digital de Elevação..... | 39 |
| 4.5. Análise das temperaturas de cobertura pela câmera térmica e termômetro em campo | 42 |
| 4.6. Delimitação das zonas de manejo..... | 47 |
| 5. CONCLUSÕES..... | 51 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 52 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Emissividade dos materiais e temperatura obtida pelos termômetros | 26 |
| Tabela 2. Estatística descritiva dos dados de temperatura da planta e umidade do solo obtidos em campo | 28 |
| Tabela 3. Correlação entre a temperatura de cobertura e umidade do solo para cada período de coleta. | 30 |
| Tabela 4. Estatística descritiva das temperaturas obtidas em campo pelo termômetro de radiação e pela câmera FLIR acoplada ao VANT..... | 43 |
| Tabela 5. Correlação e diferença absoluta média entre as temperaturas de cobertura obtidas pela câmera FLIR acoplada ao VANT e as obtidas pelo sensor terrestre..... | 46 |
| Tabela 6. Valores médios de cada classe do Talhão 2..... | 49 |
| Tabela 7. Valores médios de cada classe do Talhão 3..... | 49 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Área de estudo que compreende os talhões de uma lavoura de café localizada na Fazenda Braúna município de Araponga, Minas Gerais, Brasil. | 12 |
| Figura 2. Esquema do veículo aéreo não tripulado (VANT): a) Vista explodida central; b) Vista explodida extremidade; c) VANT completo. | 14 |
| Figura 3. Estrutura do disparador e fixação do sistema no VANT: a) posição do servo motor; b) Fixação na câmera para disparo; c) conexão com o VANT. | 16 |
| Figura 4. Parte do plano de voo previamente elaborado da área de estudo. | 17 |
| Figura 5. Coleta de temperatura e umidade no cafezal: a) demarcação dos pontos; b) Medição de temperatura da copa; c) Medição de umidade do solo. | 18 |
| Figura 6. Esquema da conversão e união das imagens. | 21 |
| Figura 7. Gráfico de falhas de obtenção de imagens pela câmera FLIR pelo tempo entre cada disparo feita pelo disparador. | 24 |
| Figura 8. Curva de calibração de temperatura. | 27 |
| Figura 9. Local de coleta dos pontos de temperatura da planta e umidade do solo. | 27 |
| Figura 10. Mapa do teor de água no solo na área para coleta de dados realizada às 10:30 hs. | 29 |
| Figura 11. Mosaico georreferenciado gerado pelas imagens do VANT. | 32 |
| Figura 12. Imagem RGB à direita e termal à esquerda de uma mesma cena obtida às 10:00 horas. | 32 |
| Figura 13. Mapas termais gerados para cada Talhão às 10:00 hs. | 35 |
| Figura 14. Mapas termais gerados para cada Talhão às 14:20 hs. | 36 |
| Figura 15. Mapas termais gerados para cada Talhão às 16:30 hs. | 37 |
| Figura 16. Número de pontos de elevação para cada método utilizado na geração do modelo digital de elevação. | 40 |
| Figura 17. Modelos digitais de elevação obtidos por levantamento usando GNSS e por imagens adquiridas por câmeras acopladas ao VANT. | 41 |
| Figura 18. Gráfico de dispersão entre as elevações obtidas pelo VANT e GNSS. | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 19. Gráfico de dispersão entre temperatura de cobertura obtida pela câmara com sensor termal acoplado ao VANT e a temperatura obtida pelo sensor terrestre nos três talhões: a) horário 10:00; b) horário 14:20; c) horário 16:30..... | 45 |
| Figura 20. Zonas de Manejo em relação a temperatura de cobertura, umidade do solo e MDT dos talhões. | 48 |

RESUMO

PORTES, Marcelo Fagundes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2018. **Sensoriamento remoto termal usando veículo aéreo não-tripulado na cafeicultura de montanha**. Orientador: Daniel Marçal de Queiroz. Coorientador: Domingos Sárvio Magalhães Valente.

A determinação da variabilidade espacial das características das lavouras do café é uma importante etapa no manejo de sistemas de agricultura de precisão. Informações como modelo digital de elevação (MDE), mapas de umidade do solo e de temperatura de cobertura tem potencial para definir zonas de manejo, que é uma das formas de manejo adotadas em agricultura de precisão. A utilização de sensoriamento remoto de baixa altitude com veículos aéreos não tripulados (VANTs) e câmeras térmicas embarcadas tornam a coleta das informações da variabilidade em campo mais fáceis de serem realizadas e apresentam boa resolução espacial. Dessa forma, este trabalho teve por objetivo desenvolver um sistema com base em VANT para determinar a variabilidade espacial da temperatura de cobertura, gerar o MDE do terreno e delimitar zonas de manejo. Para isso foi desenvolvido um sistema de aquisição automática das imagens de uma área cultivada com café nas bandas do visível e do termal utilizando um VANT. As imagens adquiridas pela câmera termal foram processadas, georreferenciadas e os valores de temperatura de cobertura comparados com os valores das temperaturas de cobertura e umidade de solo coletas com sensores proximais em campo. O MDE obtido pelo VANT foi comparado com o obtido por levantamento altimétrico com Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS). Para isso, foi analisada correlação entre valores de altitudes obtidas em pontos comuns nos dois MDEs gerados. As zonas de manejo foram geradas por análise de agrupamento dos dados de temperatura de cobertura da lavoura, MDE e umidade do solo. Comparado a temperatura de copa coletada com termômetro infravermelho proximal e com as imagens termais obtidas pelo VANT, em horários distintos, verificou-se que o melhor horário para obtenção do mapa de cobertura foi às 14:20 hs. A temperatura de cobertura não apresentou correlação significativa com a umidade do solo. O MDE obtido pelo VANT apresentou boa concordância com o MDE obtido por levantamento

altimétrico. As zonas de manejo foram delimitadas, sendo quatro o número ideal de classes para a área estudada.

ABSTRACT

PORTES, Marcelo Fagundes, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2018. **Thermal remote sensing by unmanned aerial vehicle in mountain coffee crop**. Advisor: Daniel Marçal de Queiroz. Co-Advisor: Domingos Sárvio Magalhães Valente.

The determination of the spatial variability of coffee crop characteristics is an important step in the management of precision agriculture systems. Information such as digital elevation model (DEM), maps of soil moisture and canopy temperature has the potential to define management zones. Management zones is one of the methods adopted in precision agriculture. Low altitude remote sensing using unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with embedded thermal cameras makes easier to get the field variability determination and shows good spatial resolution. Thus, the objective of this work was to develop a system using an UAV to determinate the spatial variability of the canopy temperature, to generate the DEM of the area and to delimit management zones. For this, an automatic system of image acquisition was developed for the UAV for monitoring a coffee field. The images taken using thermal camera were processed and georeferenced. The canopy temperature values obtained by the thermal camera were compared to canopy temperature values and soil humidity collected using proximal sensors. The DEM obtained by the UAV was compared to the DEM obtained by a Global Navigation Satellite System (GNSS). The correlation between altitude values obtained by the two DEMs was calculated. The management zones were generated by cluster analysis using data from crop canopy temperature, DEM and soil moisture. Comparing the canopy temperature collected with proximal infrared thermometer and the thermal images obtained by the UAV, at different times, it was verified that the best time for imaging the canopy temperature was at 2:20 pm. The canopy temperatures did not have significant correlation with soil moisture. The DEM obtained by the UAV showed good agreement with the DEM obtained by GNSS. The management zones were delimited, with four the optimum number of classes for the analyzed coffee field.

1. INTRODUÇÃO

A importância da cultura do café vem crescendo devido ao aumento do consumo pelo mundo. O Brasil ganha destaque por ser o principal produtor e exportador desse grão, respondendo por cerca de 30% de toda produção mundial em 2016. Com uma participação no PIB de US\$ 2,4 bilhões e geração de empregos pelas regiões produtoras, o café é um importante produto para a economia do país (International Coffee Association, 2016).

Por ser uma cultura perene e por apresentar o fenômeno da bienalidade de produção, o retorno financeiro obtido com a exploração é bastante variável de uma safra para outra. Assim, os produtores têm que estar sempre buscando por formas mais eficientes de manejar a lavoura para se manterem competitivos (International Coffee Association, 2016). O café é um dos poucos produtos agrícolas em que o preço é baseado em parâmetros qualitativos, e o valor aumenta significativamente com a melhoria da qualidade.

Para se obter café de melhor qualidade pode-se utilizar técnicas de agricultura de precisão. A Agricultura de Precisão (AP), técnica que se baseia no manejo a sítio específico, apresenta potencial para se manejar lavouras de café visando melhorar o retorno financeiro. Esse retorno financeiro pode ser obtido via reduções de custo de produção e/ou ganhos de produtividade e de qualidade.

Determinar a variabilidade espacial das características das lavouras cultivadas utilizando agricultura de precisão é essencial para um bom manejo na área. Uma das aplicações dessa informação é o zoneamento e classificação das áreas de acordo com suas características, obtido a partir de um processo chamado delimitação de zonas de manejos. Geralmente, as variáveis delimitadoras das zonas de manejo devem apresentar dependência espacial e estabilidade temporal e estar relacionada com a produtividade ou com a qualidade do produto.

O modelo digital de elevação (MDE) e mapas da temperatura de cobertura são importantes informações para classificar a lavoura e realizar previsões na produção (Khanal, Fulton, e Shearer, 2017). O modelo digital de elevação representa o relevo da área onde a cultura está implantada. O relevo

tem efeito sobre a distribuição espacial e movimentação de água e de partículas no solo podendo afetar o desenvolvimento da cultura (Kravchenko e Bullock, 2000). A temperatura de cobertura obtida por sensoriamento remoto pode ser utilizada para identificar áreas da lavoura sob estresse, principalmente estresse hídrico na cultura (Jackson et al., 1981).

O sensoriamento remoto está se tornando uma das técnicas mais estudadas para o monitoramento das culturas em sistemas de agricultura de precisão. O sistema de medição não tem contato com o objeto a ser medido e por isso tem a característica de não ser destrutivo. Algumas formas de sensoriamento remoto são realizadas por meio da obtenção de imagens multiespectrais e hiperespectrais do campo de produção. Em um sistema multiespectral, a imagem é capturada em comprimentos de ondas específicos, podendo variar entre três e dez bandas do espectro. Já as imagens hiperespectrais podem chegar a ter mais de mil diferentes bandas de medição. Aumentando-se a resolução espectral, mais dados são obtidos acerca do alvo e uma análise mais completa pode ser realizada.

O sensoriamento remoto por satélite apresenta alguns problemas quando aplicado na agricultura de precisão. A baixa resolução temporal é um deles, a maioria dos sistemas leva alguns dias para que o satélite possa imagear uma área novamente. Outros problemas são a resolução espacial do satélite e a possível presença de nuvens, dificultando o imageamento. O sensoriamento remoto utilizando aeronaves é caro, possui dificuldades técnicas e também apresenta restrição em relação a presença de nuvens. No entanto, atualmente pesquisadores têm lançado mão de pequenos veículos aéreos não-tripulados (Zhang e Kovacs, 2012; Primicerio et al., 2012; Schmale, Dingus, e Reinholtz, 2008; Bachmann et al., 2013; Gómez-Candón, De Castro, e López-Granados, 2014; Honkavaara et al., 2013; Torres-Sanchez et al., 2014). Esse tipo de plataforma não demanda muito investimento e pode ser utilizado para aquisição de imagens multiespectrais, hiperespectrais e termais. Dependendo do sistema utilizado, a resolução espacial pode ser da ordem de um centímetro.

Os veículos aéreos não-tripulados (VANTs) têm a característica de realizar o sensoriamento remoto em baixa altitude. Os VANTs estão se tornando uma popular ferramenta para o monitoramento ambiental. A

flexibilidade para voos e o baixo custo pela aquisição das imagens tornam o uso de VANTs mais atrativo que aviões convencionais tripulados como plataformas para sensoriamento remoto (Zhang e Kovacs, 2012). Nos VANTS pode-se acoplar diferentes tipos de câmeras para gerar índices de vegetação e mapas térmicos do ambiente de produção.

Com os avanços na termometria e câmeras termais de alta resolução acopladas aos veículos aéreos não-tripulados, as possibilidades de obtenção de importantes informações da cultura se tornam mais acessíveis e ajudam a entender as variabilidades em campo. Com o auxílio das características topográficas, de solo e das plantas, coletadas a partir de sensoriamento remoto por VANTs, pode-se fazer o diagnóstico sobre o estado da produção em tempo real. Dessa forma, este trabalho teve por objetivo desenvolver um sistema utilizando VANT para se determinar a variabilidade espacial da temperatura de cobertura, gerar o MDE do terreno e delimitar zonas de manejo. Os objetivos específicos foram:

- Desenvolver um sistema de aquisição de imagens termais utilizando câmera de baixo custo acoplada a um VANT;
- Desenvolver técnicas de processamento e análise de imagens aéreas termais, visando determinar a variabilidade da temperatura do dossel e o melhor horário para a aquisição das imagens;
- Determinar a variabilidade espacial da temperatura de cobertura e da umidade do solo em uma área cultivada com café e analisar a relação entre essas duas variáveis;
- Determinar o modelo digital de elevação a partir de imagens obtidas por VANT e analisar o erro do modelo gerado por essa técnica;
- Delimitar zonas de manejo por análise de agrupamento utilizando temperatura de cobertura, MDE e umidade do solo.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Cafeicultura Brasileira

O café é produzido em diferentes regiões do país o que resulta em tipos variados do produto. Com essa diversidade do produto obtém-se diferentes características de qualidade de bebida. Essa variabilidade de qualidade faz com que os preços alcançados pelo produto também sejam diferentes. Além disso, possibilita atender as diferentes demandas do mercado. Com a vasta área de produção, o Brasil é o maior produtor e exportador de café, além de ser o segundo maior consumidor do produto no mundo (Brasil, 2017).

A área cultivada com café no Brasil em 2018 é de 2,168 milhões de hectares, cerca de 1,8% inferior a cultivada no ano anterior. Dessa área total, 287,7 mil hectares (13%) representa área de café em formação e 1,88 milhão de hectares (87%) em produção. A variedade Arábica ocupa 80% desse total. O estado de Minas Gerais é o principal produtor de Arábica do país (CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento, 2018).

A produtividade média brasileira estimada para a safra 2018 é de 1852 kg por hectare (30,86 sacas por hectare). Essa produtividade é 27,8% maior que a da safra passada. Um acréscimo já esperado para todas áreas produtoras devido ao fator bienalidade positiva. Já para os cultivos de conilon, a expectativa é de produtividades superiores devido as melhores condições climáticas mais favoráveis durante o desenvolvimento das lavouras (CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento, 2018).

Grande parte do café produzido no Brasil é comercializado como commodity. O café commodity tem preços menores que os dos cafés especiais. Segundo a Associação Brasileira de Cafés Especiais (BSCA, 2018), em 2017 foram produzidas 8,5 milhões de sacas de café classificadas com especial, obtendo uma evolução da produção, em média, 15% nos últimos anos. Em fazendas que visam a produção de cafés especiais, apenas cerca de 50% são vendidas para este fim. Todo restante são negociados como commodity (Sylbersztajn e Farina, 2001).

O café é uma planta perene e apresenta porte arbóreo ou arbustivo com seis fases fenológicas. Segundo Camargo (2001), a caracterização das

fases facilita identificação da necessidade de água e momentos de estresse hídrico, reconhecer a melhor época de aplicação de tratamentos fitossanitário e execução de operações agrícolas necessárias. As condições ambientais têm grande interferência na produção dos frutos do café, suas fases fenológicas podem ser afetadas com a variação fotoperiódica, altitude e condições meteorológicas de distribuição pluviométrica e temperatura, tendo reflexos tanto na planta quanto na produtividade e qualidade da bebida (Fernandes et al., 2012).

2.2. Agricultura de Precisão

A necessidade de tornar os sistemas agrícolas eficientes força avanços nas técnicas de aproveitamento do potencial produtivo das lavouras. Isso tem levado à integração de ferramentas, tecnologias e sistemas de gerenciamento de informações sob o conceito de Agricultura de Precisão (AP) (Khanal, Fulton e Shearer, 2017). A agricultura de precisão envolve o gerenciamento das variabilidades espaciais encontradas e que visa otimizar a aplicação de insumos agrícolas para melhorar eficiência e manejo. Assim, corretas dosagens de insumos são aplicadas em local certo e no tempo certo (Gebbers e Adamchuk, 2010).

Pode-se usar diferentes formas de obtenção de dados para agricultura de precisão. Esses dados podem ser analisados com a ajuda de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os Sistemas de Informações Geográficas têm ferramentas para realizar a interpolação e produzir mapas que representam a variabilidade espacial das variáveis (van der Meer, 2012). O uso dos dados na plataforma SIG ligado aos sistemas de apoio a decisão podem auxiliar no monitoramento e na definição das práticas de manejo a serem adotadas (Lindblom et al., 2017).

2.2.1. Delineamento de Zonas de Manejo em Agricultura de Precisão

As ferramentas de SIG permitem a análise de dados importantes para a produção agrícola. É possível mapear os atributos do solo, das plantas, analisar a variabilidade espacial, e gerar classes de manejo, que são subáreas do campo de produção que apresentam características que podem ser consideradas homogêneas. A mensuração e classificação destes atributos torna possível criar mapas de prescrição de insumos para o manejo a sítio específico. Também permite a delimitação de zonas de manejo utilizando variáveis associadas à possíveis fatores limitantes da produtividade e criar mapas de prescrição definindo dosagens de insumos específicas para cada zona de manejo (Yao et al., 2014).

Geralmente, as variáveis delimitadoras das zonas de manejo devem apresentar dependência espacial e estabilidade temporal, e estarem relacionadas a produtividade da lavoura ou qualidade do produto. Diferentes informações são utilizadas a fim de delimitar as zonas de manejo, sendo eles atributos físicos e químicos do solo (Córdoba et al., 2016), dados de produtividade (Bazzi et al., 2013), condutividade elétrica aparente do solo (Molin e Castro 2008; Valente et al., 2012) e mapas de índices de vegetação provenientes de sensoriamento remoto (Pedroso et al., 2010).

A geração das zonas de manejo consiste em classificação multivariada local e análise de agrupamentos dos atributos. A ideia se baseia em agrupar as características que mais se assemelham, considerando critérios previamente determinados. Algoritmos de agrupamento são amplamente usados para a identificação de potenciais zonas de manejo (Córdoba et al., 2016). Segundo Pedroso et al. (2010), métodos como algoritmos de agrupamento k-means são comumente utilizados para a geração das zonas de manejo. O programa FuzME (Minasny & McBratney, 2002) foi projetado para realizar essas análises de agrupamento usando algoritmo fuzzy k-means (Córdoba et al., 2016).

2.3. Sensoriamento Remoto em Agricultura de Precisão

A prática da agricultura de precisão apresenta diversas etapas, como a identificação da variabilidade em campo, geração de mapas, zoneamento da área, manejo a sítio específico e tomada de decisão. O sensoriamento remoto pode estar envolvido como o principal procedimento para a obtenção das informações em campo. Assim, a necessidade de obter imagens e mapas atualizados durante todo o processo de tomada de decisão, mapeando a variabilidade em tempo hábil, torna o imageamento por sensoriamento remoto uma ferramenta essencial para AP (Zhang e Kovacs, 2012).

A utilização do sensoriamento remoto na análise de informações da produção agrícola pode utilizar diferentes plataformas e sensores. As plataformas são divididas em terrestre, aérea e orbital, e a utilização mais comum entre elas são os satélites orbitais. Sensores embarcados em diferentes plataformas podem possuir características e objetivos distintos, sendo elas a coleta de energia refletida (visível e infravermelho próximo), energia emitida (infravermelho termal) e energia difusa (ondas curtas). Outros tipos de características de sensoriamento remoto podem ser listados como o espectro eletromagnético (visível, infravermelho e micro-ondas), número de bandas para cada espectro (pancromática, multiespectral e hiperespectral), resolução espacial (alta, média ou baixa), resolução temporal (hora, dia, semana na frequência de imageamento), resolução radiométrica (8, 12 e 16 bits) e fonte de energia (passivo ou ativo) (Metternicht, 2008).

Na agricultura, as técnicas de sensoriamento remoto vêm sendo progressivamente mais estudadas para monitoramento. Os sistemas multiespectrais possuem comprimentos de ondas específicos, podendo variar seus espectros em algumas bandas. Imagens multiespectrais vêm sendo utilizadas para detectar estresses nutricionais (Zhao et al., 2012; Herwitz et al., 2004) e estresse hídrico (Detar, Penner, e Funk, 2006); para determinar parâmetros biofísicos das culturas (Lelong et al., 2008); para detectar infestações por plantas daninhas (Bajwa e Tian, 2001; Herwitz et al., 2004); para detectar pragas e doenças (Lan, Y.; Huang, Y. e Hoffmann, 2007; Moshou et al., 2011) e para estimar a produtividade e a quantidade de biomassa (K. C. Swain, S. J. Thomson, 2010).

Outra forma é o imageamento hiperespectral, obtendo imagens que podem possuir milhares de bandas diferentes para a medição. Quanto maior o número de bandas espectrais, mais informações são obtidas em toda área imageada. Com isso, é possível análises mais apuradas, embora seja gerado um volume elevado de dados. Para as análises de variabilidade temporal, o volume de dados exige um maior processamento para análises, sendo necessário algoritmos especiais. Imagens hiperespectrais vêm sendo utilizadas para detectar estresse nutricional (Haboudane et al., 2002) e estresse hídrico (Roemer et al., 2012); para detectar presença de plantas daninhas (Lass et al., 2005), para detectar pestes e doenças (Bauriegel et al., 2011) e para estimar a produtividade (Yang et al., 2013).

2.3.1. Sensoriamento Remoto de Baixa Altitude

A utilização de sensoriamento remoto em agricultura de precisão tem como gargalo a confiabilidade dos dados. Muitas restrições como a qualidade da imagem, sua resolução espacial e temporal e custo de aquisição dependentes de sensores orbitais dificultam seu uso. Com os avanços da tecnologia envolvendo aeronaves remotamente pilotadas, o sistema de sensoriamento remoto de baixa altitude se torna um novo conceito para aquisição de imagens aéreas da superfície terrestre para AP (Swain, 2007). A aquisição das imagens geralmente é obtida por sensores montados em veículos aéreos não-tripulados equipados com GPS, sensores de altitude e pressão, bússolas magnéticas e unidade de medida inercial, do inglês Inertial Measurement Unit (IMU), que tornam preciso o sistema de posicionamento da imagem gerada.

O sensoriamento remoto de baixa altitude torna o imageamento possível bem abaixo da cobertura das nuvens e mais próximo das características de interesse em campo, com uma alta resolução espacial na ordem de centímetros. Outros fatores como custo relativamente baixo de aquisição e o momento de aquisição em tempo real indicam esta plataforma de sensoriamento remoto ideal para o mapeamento e monitoramento em AP (Zhang e Kovacs, 2012).

2.3.2. Sensoriamento Remoto Termal

O sensoriamento remoto termal é utilizado com o objetivo de mensurar a radiação térmica emitida pelos objetos sem que seja necessário o contato direto (Khanal, Fulton, e Shearer, 2017). Segundo Prakash (2000), todo objeto acima de 0 Kelvin ou $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ emite radiação, sendo esta em função da emissividade e temperatura da superfície do objeto.

O sensoriamento remoto no monitoramento termal da produção foi proposto por Tanner (1963), com o objetivo de identificar estresse hídrico entre plantas com diferentes regimes usando sensores infravermelho termal. Outro trabalho semelhante propôs a geração de um índice de estresse hídrico, indicando a necessidade de água na planta em sistema irrigado (Jackson et al., 1981).

Com o passar dos anos, avanços na tecnologia de câmeras e sensores termais produziram equipamentos menores e mais baratos, o que viabilizou economicamente seu uso na agricultura de precisão. Assim, o uso do sensoriamento termal na agricultura pode ser usado para vários tipos de monitoramento e análise, bem como montados em veículos aéreos não-tripulados para um sensoriamento remoto de baixa altitude. Trabalhos como identificação de estresse hídrico em plantas (Cohen et al., 2017; Bellvert et al., 2016; Gonzalez-Dugo et al., 2013), evapotranspiração de plantas (Shafian e Maas, 2015), mapas de textura de solo (Wang et al., 2015), detecção de doenças (Calderón et al., 2013), cobertura de resíduos (Kozak et al., 2007) e maturidade e previsão de produtividade (Bulanon et al., 2008) evidenciam o crescente uso da medição de temperatura em sensoriamento para análises e monitoramento das culturas.

2.4. Veículos Aéreos Não-Tripulados

Veículo aéreo não-tripulado (VANTs), em inglês Unmanned Aerial Vehicle (UAV) pode ser reconhecido por diferentes nomes como Sistema Aéreo não Tripulado, “Robô Voador” e o termo mais popularmente conhecido como Drone (Colomina e Molina, 2014). Nos últimos anos, veículos aéreos não-tripulados e aeronaves remotamente pilotadas são cada vez mais

adotados em sensoriamento remoto (Colomina e Molina, 2014). Em comparação com sistemas terrestres de sensoriamento, os VANTs têm a capacidade de examinar áreas com maior velocidade e sem perturbar a cobertura presente (Burkart et al., 2015).

Os sistemas aéreos não-tripulados estão disponíveis em uma grande variedade de modelos de aeronaves para usuários civis, contudo, são de difícil pilotagem para novos usuários. Treinamentos especializados em pilotagem de VANTs podem garantir um início mais confortável em trabalhos, mas a regulamentação confusa em grande parte do mundo desencoraja novos usuários no ramo (Watts, Ambrosia, e Hinkley, 2012).

Com maior facilidade de buscar conhecimento sobre VANTs, a aplicação dessa ferramenta de trabalho está em franca expansão no mundo. Estimativas realizadas pelo Grupo Teal (Teal, 2014) é que a comercialização de veículos aéreos não-tripulados tenha atingido o valor de 5,7 bilhões de dólares em 2014, com uma projeção de atingir 9,9 bilhões de dólares em 2024. A utilização para fins civis hoje corresponde a 11% do total comercializado, e em 2024 espera-se que esse montante alcance 14% do total. Nas aplicações civis, a agricultura é tida como um dos potenciais setores de utilização dos veículos aéreos não tripulados.

Os VANTs para uso civil são controlados por uma estação de controle terrestre, do inglês Ground Control Stations (GCS), que se utiliza de um software de controle direto ou programado para uma rota. Embora o termo se refira a terrestre, os controles podem ser feitos por estações com bases marítimas ou aéreas. Segundo Colomina e Molina (2014), as GCS são provavelmente tão importantes quanto as próprias aeronaves não-tripuladas, pois permitem a interface com a "inteligência humana". Qualquer mudança na rota do VANT, qualquer eventual erro na plataforma aérea e/ou qualquer resultado dos sensores de carga devem ser enviados e vistos dentro do GCS.

Segundo Nonami et al. (2010), os VANTs podem ser classificados como: asas fixas, asas rotativas, balões dirigíveis e asas oscilantes (bater de asas). Aeronaves de asa fixa, helicóptero e a geração mais recente de VANTs quadricópteros com capacidade vertical de decolagem e aterrissagem têm se mostrado instrumentos úteis na agricultura local (Nebiker et al., 2008; Rango et al., 2009).

Os sensores acoplados aos VANTs aplicados ao sensoriamento remoto na agricultura são baseados em sensores já existentes em aeronaves convencionais, mas com uma redução em tamanho (Hunt e Daughtry, 2017). Embora já haja uma variedade de aplicações, VANTs ainda possuem problemas na confiabilidade da plataforma, capacidade de sensor, processamento de imagem e disseminação de produtos finais (Zhang e Kovacs, 2012).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Área de estudo

O experimento foi conduzido em três talhões de café de aproximadamente três hectares, localizados na Fazenda Braúna no município de Araponga, Minas Gerais, Brasil (Figura 1). Os talhões escolhidos possuem altitude média de 825 m e um relevo montanhoso. A área é cultivada com café da espécie *Coffea arabica* L..

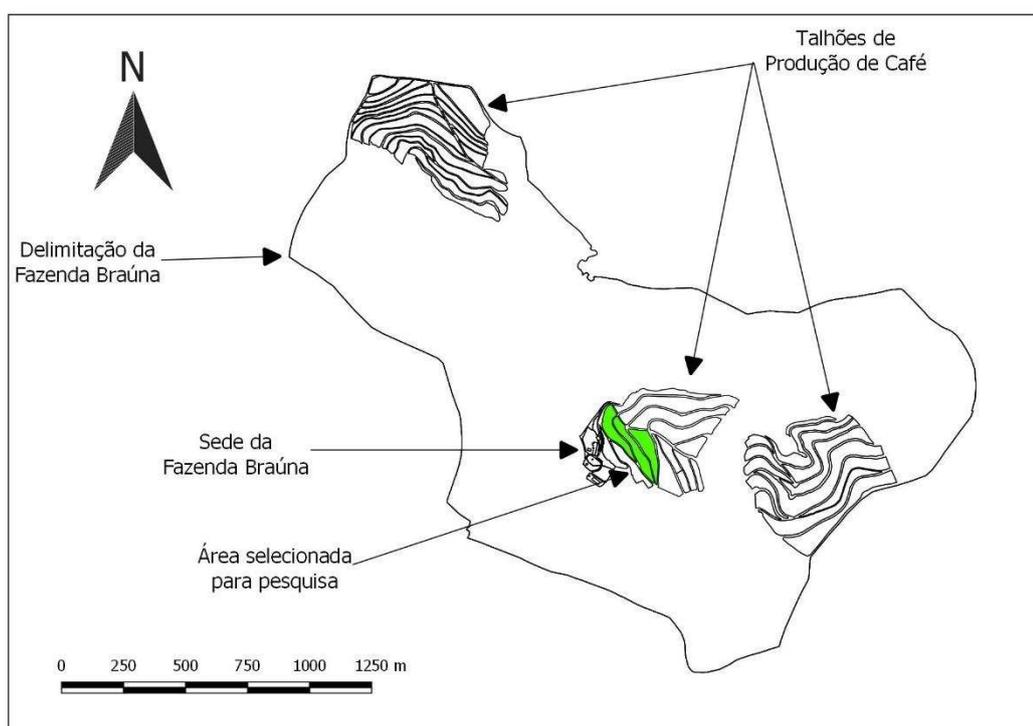


Figura 1. Área de estudo que compreende os talhões de uma lavoura de café localizada na Fazenda Braúna município de Araponga, Minas Gerais, Brasil.

3.2. Veículo aéreo não-tripulado utilizado

Um VANT multi-rotor foi desenvolvido para a realização desse trabalho. O VANT foi desenvolvido com material de fibra de carbono com uma extensão de 650 milímetros. Sua estrutura era em “X” com quatro motores, comumente denominado de quadricóptero. Todos seus componentes estruturais foram unidos por parafusos. Cada braço tinha em suas extremidades suporte para o acoplamento dos motores e ESCs (Eletronic Speed Control).

Os motores utilizados no VANT foram de 680 kv (rpm/volt) ligado aos ESCs de 40 A (Amperes). Seus motores com uma menor rotação garantiam maior torque e estabilidade. As hélices utilizadas foram de fibra de carbono com extensão de 15 polegadas. No centro do chassi foi fixada uma placa distribuidora de energia para a alimentação de todo sistema do VANT. Foi utilizada uma bateria LiPo (lítio-polímero) de 14,4 V com 5,2 Ampere-hora para alimentação do sistema. Ao centro do chassi também foi posicionada a controladora de voo Pixhawk (Open hardware, Suíça) que se conectava com GPS Neo M8n (U-blox, Suíça) com bússola, telemetria, rádio transmissor AT9 (Radiolink, China) e ESCs. Toda fiação foi posicionada internamente ao chassi e interiormente nos braços da estrutura. Os suportes para pouso em formato "T" foram unidos na parte central da estrutura. Um suporte acima da parte central superior da estrutura foi colocado para sustentar a bateria do VANT. Todo sistema fornecia uma autonomia de cerca de 20 minutos de voo. Na Figura 2 é apresentada a estrutura do VANT.

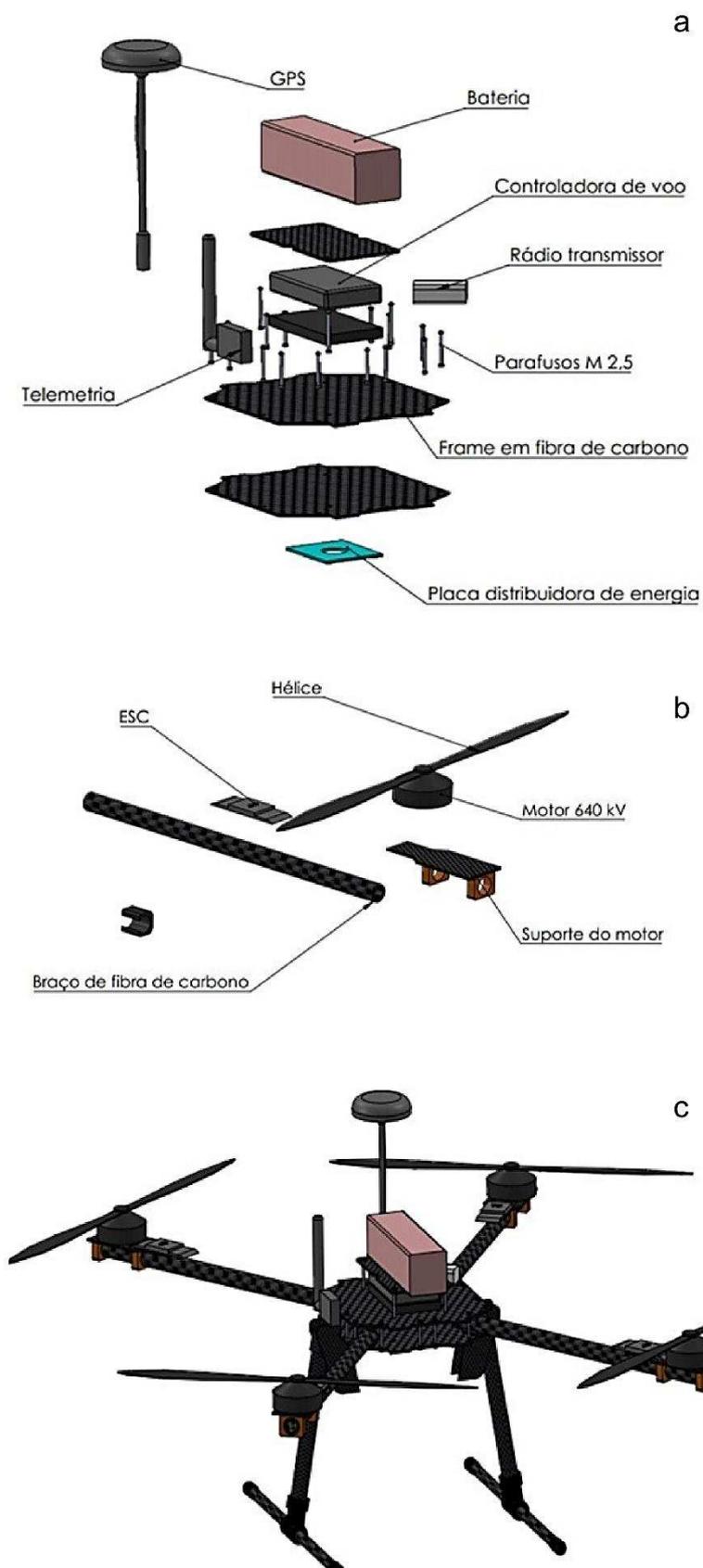


Figura 2. Esquema do veículo aéreo não tripulado (VANT): a) Vista explodida central; b) Vista explodida extremidade; c) VANT completo.

3.3. Câmera termal e sistema de aquisição de fotos aéreas

Uma câmera térmica FLIR C2 (FLIR Systems, Estônia) foi adaptada ao VANT. Essa câmera compacta era dotada de disparador manual. A câmera FLIR C2 utilizada possui um sensor RGB e um sensor termal infravermelho. A resolução das imagens RGB era de 640x480 pixels. Já o sensor termal possuía faixa espectral 8-14 μm e resolução das imagens de 320x240 pixels com uma sensibilidade menor que 0,10 $^{\circ}\text{C}$ e uma faixa de temperatura para medição de -10 $^{\circ}\text{C}$ a +150 $^{\circ}\text{C}$, tendo precisão de ± 2 $^{\circ}\text{C}$ (SYSTEM FLIR, 2016). A emissividade (ϵ) representa a razão na mesma temperatura entre a energia radiante emitida por uma superfície e a emitida por um corpo negro. Câmeras com sensores termais tem a função de ajustar a emissividade de acordo com as propriedades físicas da superfície do alvo. O valor numérico correto da emissividade torna mais preciso a medição de temperatura pelo sensor termal. Foi configurada na câmera termal emissividade de 0,98, indicada para superfícies de vegetação natural (Idso et al., 1969).

O disparo da câmera FLIR C2 acoplada ao VANT foi executado por um sistema eletromecânico acoplado próximo ao botão disparador manual da própria câmera. Um servo motor Tower Pro MG996R DIGI HI-TORQUE alimentado pela bateria do VANT e ligado a controladora de voo foi fixado e configurado para poder disparar a câmera pressionando o botão (Figuras 3a e 3b). Sua configuração era feita por meio da controladora de voo e pelo programa de computador Mission Planer (Michael Osborne, 2013) mediante o tempo de acionamento e um sinal PWM. A câmera foi fixada na parte inferior do VANT de forma rígida, sem nenhum grau de liberdade, apontada para baixa, a nadir (Figura 3c). O acionamento do sistema de disparo da câmera ocorreu de forma automática. O comando de disparo foi realizado pela placa controladora conforme o planejado no programa de computador Mission Planner, de acordo com o plano de voo elaborado.

Foi testado o funcionamento do sistema de disparo juntamente com a obtenção de imagens pela câmera. Esse teste consistiu em verificar o tempo de captura de cada imagem da câmera termal pelo acionamento do disparador. Foi determinado intervalos entre cada captura (1, 2, 3, 4, 5, 6 segundos) e durante um minuto foi acionando o disparador nesses intervalos.

O acionamento foi feito pelo rádio controle, que mandava o sinal para a placa controladora e movia o servo. Foi determinado como o tempo ótimo para o disparo entre cada imagem aquele que apresentava nenhuma falha na obtenção das imagens.



Figura 3. Estrutura do disparador e fixação do sistema no VANT: a) posição do servo motor; b) Fixação na câmera para disparo; c) conexão com o VANT.

3.4. Plano de Voo, coleta de temperatura, umidade local e georreferenciamento

Todo o planejamento do imageamento da área foi previamente elaborado utilizando o programa de computador de livre acesso Mission Planner. Esse programa tinha como função a elaboração de planos de voos autônomos assim como o acompanhamento de voo e o controle aéreo em tempo real do VANT. Foram elaborados planos de voo para cada horário ao longo do dia, sendo um para as 10:00 horas, outro para 14:20 horas e finalmente outro para as 16:30 horas do dia 17 de abril de 2018. Os planos foram elaborados para voos à 50 metros de altura a partir do ponto de decolagem. Cada plano continha os pontos de partida e chegada, o sentido e a trajetória de voo e o número de imagens que seriam adquiridas (Figura 4).



Figura 4. Parte do plano de voo previamente elaborado da área de estudo.

Para validar o sistema de aquisição de temperatura da área obtida pela câmera FLIR C2, realizou-se a coleta da temperatura em 51 pontos da área utilizando-se um termômetro infravermelho FLUKE 62 Max (Fluke Corporation, China) nos mesmos horários em que as imagens foram adquiridas. Esse aparelho foi calibrado utilizando um sensor termopar tipo K como referência. O sensor termopar tipo K é recomendado para determinação de temperaturas na faixa de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1370\text{ }^{\circ}\text{C}$ e obtém a temperatura por contato direto com o objeto. A calibração consistiu em medir a temperatura de cinco objetos de emissividade conhecida com o termopar e termômetro infravermelho. A emissividade de cada objeto foi ajustada no termômetro infravermelho para a temperatura ser captada de forma correta. Foi feita uma curva de calibração com as temperaturas de cada objeto utilizando ambos termômetros, corrigindo os valores de temperatura dos pontos obtidos em campo pelo termômetro infravermelho. O termômetro infravermelho FLUKE 62 Max possuía uma faixa de medição de -30°C a 500°C com uma faixa espectral de 8 a 14 μm especificados pela empresa Fluke Corporation. Todos

os pontos de leitura de temperatura foram previamente georreferenciados e demarcados. Na Figura 5a é mostrado como os pontos de leitura foram demarcados e na Figura 5b é mostrado como a leitura da temperatura era realizada. Toda coleta pelo termômetro infravermelho foi em condição de tempo aberto sem presença de nuvens, com incidência solar direta na copa das plantas. A coleta de temperatura foi efetuada na copa das árvores de café por meio de média de 5 pontos em toda copa e a uma distância de 30 a 40 centímetros do alvo. A emissividade do aparelho foi ajustada com o mesmo valor da câmera termal, 0,98.



Figura 5. Coleta de temperatura e umidade no cafezal: a) demarcação dos pontos; b) Medição de temperatura da copa; c) Medição de umidade do solo.

Em todos os pontos demarcados também era feita a determinação da umidade do solo. A umidade do solo foi determinada utilizando um medidor modelo FieldScout TDR 300 (Spectrum Technologies, Estados Unidos). O FieldScout TDR 300 utiliza a técnica da reflectometria no domínio do tempo para determinar o conteúdo volumétrico de água no solo. As leituras foram realizadas na projeção da copa das plantas (Figura 5c). Para cada ponto de coleta três medições foram feitas e obtendo a média deles. A umidade do solo foi determinada em dois horários, um logo após o primeiro voo do dia e o segundo logo após o último voo do dia, com finalidade de identificar a variabilidade da umidade do solo durante o dia.

Os pontos de coleta de temperatura da copa e umidade do solo foram georreferenciados utilizando o GPS Topográfico (L1), modelo Pro XT (Trimble, Estados Unidos), cuja correção diferencial foi feita utilizando a base de dados

do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), localizada no município de Viçosa-MG. O sistema de coordenadas utilizado foi o UTM com Datum World Geodetic System 1984 zona 23S (WGS 84). A correção diferencial foi realizada utilizando o GPS Pathfinder Office ® v. 5.00 fornecido pelo fabricante do aparelho GPS.

Planilhas com os valores determinados de umidade do solo e temperatura da copa foram preparadas. Cada dado coletado foi associado à sua respectiva posição geográfica coletada pelo GPS. As tabelas contendo essas informações foram utilizadas pelo programa QGIS versão 3.0 (QGIS development team, open source Geospacial Foundation, Estados Unidos) e transformados em pontos vetoriais georreferenciados.

3.5. Aquisição das imagens aéreas

As imagens em RGB foram realizadas utilizando uma sobreposição de 70% no sentido do voo e 70% transversal ao sentido do voo. Já as imagens termais a sobreposição foi menor e não possuía um valor fixo pois o ângulo de abrangência da câmera termal diferia da câmera RGB. Como a altura de voo foi definida como 50 metros a partir do local de decolagem, isso resultou em imagens com uma resolução espacial de aproximadamente 0,21 metros para a câmera termal. A condição do tempo no momento de aquisição das imagens era estável, ensolarado com poucas nuvens, propiciando uma boa condição para obtenção de imagens termais.

3.6. Processamento das imagens termais obtidas a partir do VANT

As imagens eram armazenadas na memória da câmera. Após o voo estas foram transferidas para um computador para o processamento. Para acessar as imagens na câmera FLIR C2 foi usado o programa de computador FLIR Tools® fornecido pela fabricante da câmera termal. Para cada disparo da câmera eram geradas três imagens, uma RGB com resolução de 640x480 pixels, uma RGB com resolução de 320x240 pixels e uma termal com 320x240 pixels. A imagem termal gerada pela FLIR C2 serve apenas para se realizar

uma análise visual da variabilidade de temperatura, não possuindo valores reais de temperatura em cada pixel. O programa de computadores FLIR Tools® versão 5.12 exporta as informações termais de cada imagem geradas pela câmera termal em arquivo de tabela de 320 linhas por 240 colunas com os valores de temperatura dos pixels.

Para o processamento foi feita a transformação dos arquivos de texto novamente em imagem com pixels de temperatura. A matriz dos valores foi convertida em imagens em níveis de cinza. Para essa transformação utilizou o programa de computador GNU Octave 4.2.1 (criado por John W. Eaton, Estados Unidos). A geração das imagens teve todos valores transformados em inteiros sem sinal de 16 bits (uint16) de ordem 1000. Essa transformação foi necessária para facilitar a obtenção das imagens a níveis de cinza da temperatura, pois dados contendo vírgula (,) poderiam distorcer os valores decimais no algoritmo utilizado para a transformação. O arquivo de saída das imagens foi em formato tif.

Com as imagens geradas pelo GNU Octave versão 4.2.1 a sequência do processamento foi com o programa de computador QGIS versão 3.0. Um mosaico de toda área de estudo foi gerado utilizando as imagens RGB com resolução de 640x480 pixels, para isso foi utilizado o programa de computador Agisoft Photoscan (Agisoft LLC, Rússia) que utilizava técnica de “structure from motion” (SFM) para reconstrução 3D da cena. O georreferenciamento foi por meio da identificação dos pontos em comum do levantamento topográfico planimétrico da fazenda e o mosaico das fotos aéreas (pontos de controle).

As imagens termais geradas pelo GNU Octave e as imagens RGB de 320x240 pixels, por terem exatamente a mesma cena da área imageada, foram unidas e adicionando a informação termal como uma banda da imagem conforme o esquema da Figura 6. Essa mesclagem de bandas foi necessária para a geração do mapa termal dos talhões de estudo. O processo de mesclar, georreferenciar e gerar o mapa foi repetido para cada talhão e para cada horário de aquisição das imagens pelo programa QGIS versão 3.0.

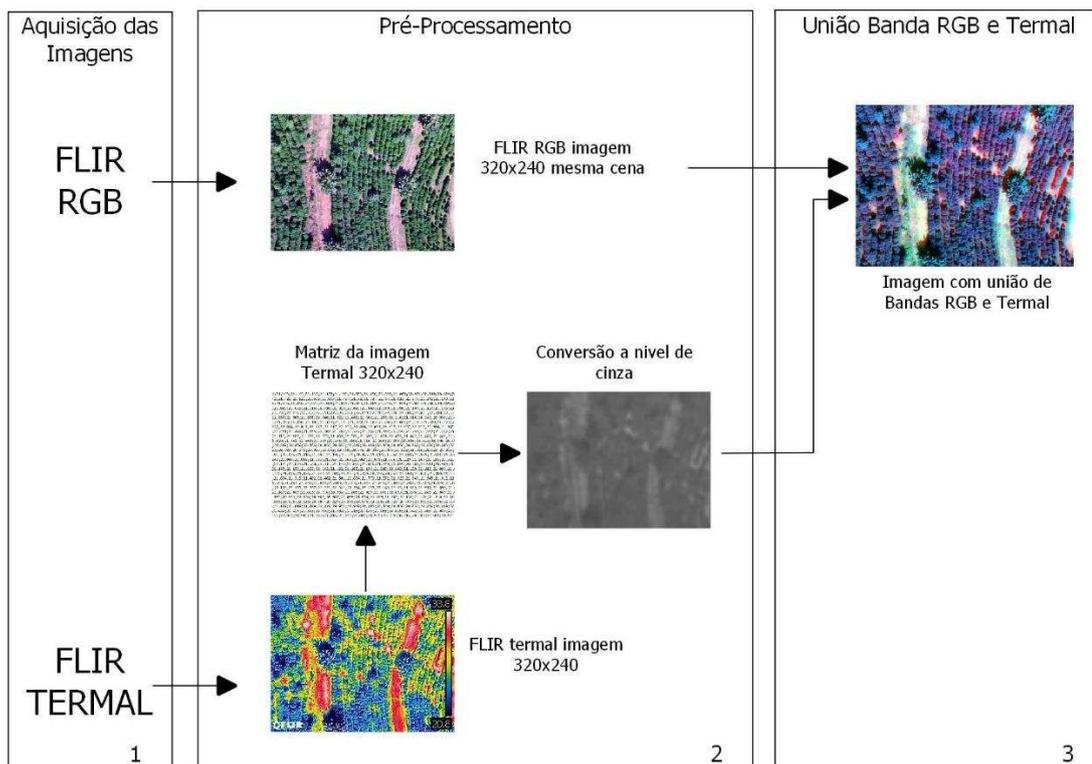


Figura 6. Esquema da conversão e união das imagens.

3.7. Geração dos mapas termais

O mapa foi obtido utilizando o raster das imagens mescladas e georreferenciadas. Com os raster do talhão posicionados, um raster virtual unindo todos os rasters em apenas um foi gerado. O contorno do talhão foi usado para o corte do raster virtual, retirando o que não representava o talhão e gerando o mapa termal. Foi repetido esse procedimento para cada talhão e horário pelo programa QGIS versão 3.0.

Os mapas termais gerados em formato raster foram vetorizados em malha de pontos, tendo suas informações de temperatura de cada pixel transformada em pontos da malha. Ao mapa termal resultante dos pontos de temperatura aéreo foi adicionado os pontos da coleta de temperatura em solo. A cada ponto de temperatura locado em sua respectiva área do mapa termal, foi gerado uma área de influência de raio 0,50 metros dos pontos de temperatura coletados pelo sensor em solo, englobando os pontos do mapa termal gerado pelas imagens térmicas do VANT. Uma intersecção entre a área de influência e os pontos de temperatura da câmera termal foi feito e retirado a média desses pontos. Essas médias dos pontos de temperatura

pela câmera termal foram adicionadas a planilha dos pontos de umidade e temperatura coletas em solo, gerando um novo arquivo com as informações de temperatura da copa obtidos pelo sensor em solo e pela câmera termal do VANT.

3.8. Determinação do melhor horário de voo para o imageamento termal

Os dados das imagens termais dos três voos foram correlacionados com os dados da coleta de temperatura pelo sensor em solo. Uma correlação foi feita para avaliar qual o horário de voo apresentava melhor relação entre a câmera e o sensor laser. O mapa termal foi selecionado a partir do melhor horário de voo obtido pelo resultado da correlação dos dados.

3.9. Geração do modelo digital de elevação e do mapa de umidade do solo

A partir de um levantamento topográfico planimétrico da fazenda, foram tomados pontos de fácil localização em uma imagem aérea para usá-los de ponto de controle na geração do Modelo Digital de Elevação (MDE) pelo VANT. Foram utilizadas as imagens RGB com resolução de 640x480 pixels. Foram tomados seis pontos de controle para toda área imageada. O MDE foi gerado com os dados de altitude e posição do VANT, os pontos de controle na área e as imagens RGB utilizando o programa Agisoft Photoscan. Já o MDE obtido pelo levantamento topográfico foi gerado por interpolação de todos os dados de elevação na área (1148 pontos) obtidos por Sistema de Navegação Global por Satélite (GNSS) com correção diferencial pela estação terrestre localizada em Viçosa (MG), distante da fazenda cerca de 32 km em linha reta. A comparação entre os mapas gerados MDE foi por correlação entre os pontos de elevação coletados pelo GNSS e os pontos de elevação obtidos por imagens do VANT, locados na mesma posição. Para a correlação foram usados 350 dos 1148 pontos posicionados na área dos três talhões. O

mapa de MDE gerado foi recortado evidenciando apenas os talhões trabalhados.

Para o mapa de umidade do solo, foi feita uma interpolação dos pontos de umidade coletados em toda área. A correlação entre a temperatura do termômetro infravermelho e a coleta de umidade foram ponto a ponto, relacionando os valores obtidos pelos equipamentos. A geração do mapa foi elaborada pelo programa QGIS versão 3.0.

3.10. Geração de zonas de manejo a partir de mapas termais, mapas de umidade do solo e MDE

Para gerar as zonas de manejo foi utilizado o método de análise de agrupamento Fuzzy K-means. Para isso foi utilizado o programa de computador FuzMe versão 3.5b (Minasny and McBratney, 2003). Foram utilizados os mapas de umidade, o MDE e o mapa de temperatura do melhor horário imageado. As zonas de manejo foram geradas para cada talhão separadamente, eliminando as áreas de estradas e carreadores. Os dados gerados pela união das informações dos mapas foram pré-processados para facilitar o desempenho do programa FuzMe. O pré-processamento consistiu no alinhamento e reclassificação de todos os pixels dos mapas, tornando todos os mapas com o mesmo número de dados. Todos dados foram transformados em um arquivo texto ordenado por classes referentes aos valores de temperatura, umidade e elevação encontrado nos mapas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Características do VANT e sistema de disparo das imagens

As características do VANT construído permitiram o acoplamento do sistema de aquisição das imagens de forma que o balanceamento não fosse alterado, evitando vibrações em sua estrutura. O disparador foi testado repetidas vezes para evitar falhas durante os voos. O servo retornou à posição inicial ao final de cada giro, fazendo-o pressionar o disparador da câmera de maneira rápida e correta. Para o intervalo de tempo entre cada disparo foi analisado a porcentagem (%) de falhas de obtenção das imagens da câmera termal (Figura 7).

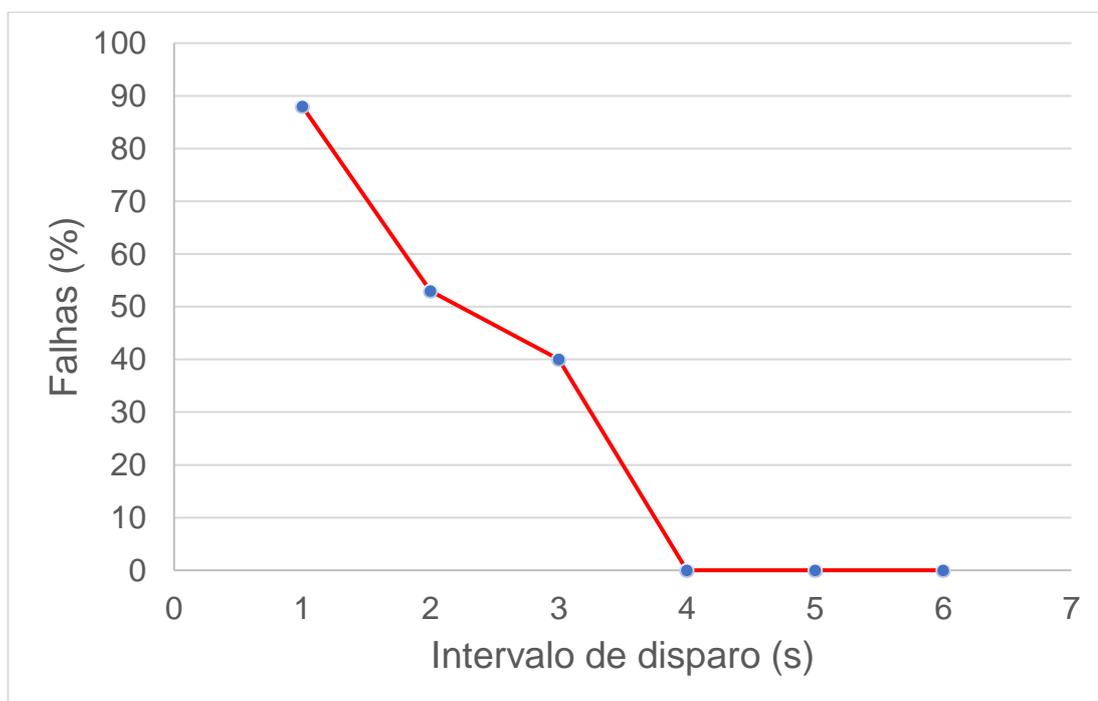


Figura 7. Gráfico de falhas de obtenção de imagens pela câmera FLIR em função do intervalo de tempo entre cada disparo feito pelo disparador.

A Figura 7 foi utilizada para determinar o intervalo ótimo entre cada imagem feita pelo disparador. A cada 4 segundos a câmera respondia os disparos sem falhas na obtenção das imagens. Esse intervalo de tempo se mostrou adequado para o disparo da câmera, sendo adotado para o disparo das imagens pelo plano de voo.

A fixação de todo o sistema de obtenção das imagens foi realizada de maneira a evitar movimentações em torno de seu eixo, proporcionando imagens sem ruído por vibrações. A velocidade do VANT, fixada em 5 m/s, permitiu a aquisição de imagens sem ruído por arrasto.

Os planos de voo foram executados sem alteração de rota, conforme planejado, capturando as imagens necessárias para o processamento. Cada imageamento da área (iniciado às 10:00, 14:20 e 16:30) durou cerca de 10 minutos. Em todo experimento foi utilizado duas baterias. Cada bateria teve autonomia de voo de cerca de 15 minutos, um tempo consideravelmente baixo podendo ser explicado pela elaboração de repetidos voos. Os esforços dos motores ao levantar voo e aterrissar eram muito maiores do que os esforços para a manutenção do voo em uma rota, tornando o gasto de bateria maior e conseqüentemente um menor tempo de voo.

4.2. Processamento dos dados coletados em solo

Simultaneamente à aquisição das imagens foram coletados dados de acordo com a Figura 9 para caracterizar o solo e para validar os valores obtidos pelo VANT. Os talhões foram divididos da direita para a esquerda em 1, 2 e 3 para facilitar a identificação pela equipe de coleta de dados. No talhão 1, foram coletados apenas dez pontos, uma vez que era uma área de difícil locomoção devido a declividade do terreno. Devido ao adensamento entre linhas do café, não houve interferência da equipe nas imagens aéreas.

A curva de calibração para o termômetro infravermelho foi definida com cinco objetos com temperaturas variadas e emissividade conhecida. A Tabela 1 relaciona os diferentes materiais com suas emissividades e os valores de temperatura obtido pelos termômetros infravermelho e termopar tipo K.

Tabela 1 – Emissividade dos materiais e temperatura obtida pelos termômetros.

| Material | Temperatura Média Termômetro Infravermelho (°C) | Temperatura Termômetro Termopar tipo K (°C) | Emissividade (ϵ) |
|---------------------------------------|---|---|-----------------------------|
| Plástico Resfriado | 13 | 13 | 0,93 |
| Granito Polido a Temperatura Ambiente | 21 | 20 | 0,85 |
| Pele Humana | 32 | 32 | 0,98 |
| PVC Aquecido | 40 | 41 | 0,93 |
| Porcelana Esmaltada Aquecida | 52 | 49 | 0,92 |

A curva de calibração é exibida pela Figura 8. Os valores de temperatura pelo termômetro infravermelho apresentaram valores próximos ao termômetro de referência termopar obtendo um R-Quadrado de 0,991. A equação da reta foi utilizada na correção de todos valores de temperatura obtidas em campo pelo termômetro infravermelho.

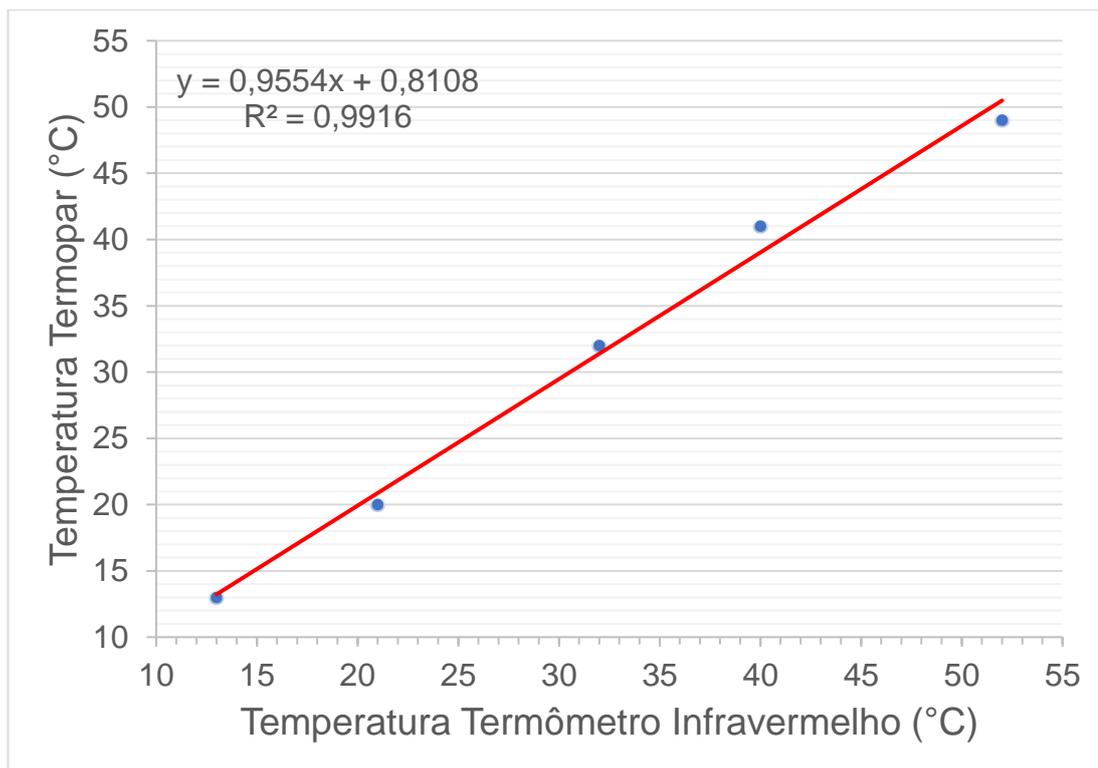


Figura 8. Curva de calibração de temperatura do termômetro de infravermelho utilizado nas determinações de temperatura das plantas de café.



Figura 9. Local de coleta dos pontos de temperatura da planta e umidade do solo.

Na Tabela 2 são apresentados os resultados da estatística descritiva dos dados coletados em solo. O posicionamento do sol, ocorrências de algumas nuvens e o sombreamento das folhas definiram a diferença de temperatura entre o período da manhã e o da tarde. Uma diferença expressiva pode ser notada pelo valor obtido no período da manhã e o das 14:20 hs. O posicionamento do sol na face dos talhões pela manhã determinou um alto valor de temperatura obtida pelo termômetro infravermelho, mesmo a temperatura ambiente sendo mais amena. Às 14:20 hs, observou-se a presença de algumas nuvens e um maior sombreamento entre plantas pela posição do sol. Isso fez com que uma amplitude térmica menor comparada à das 10:00 hs fosse observada. Com uma maior temperatura ambiente as 14:20 hs, a mínima temperatura obtida pelo sensor termal apresentou um maior valor nesse horário.

Tabela 2 – Estatística descritiva dos dados de temperatura da planta e umidade do solo obtidos em campo

| Variáveis | Média | Desvio Padrão | Máximo | Mínimo | Mediana | CV ⁶ (%) |
|----------------------------|--------|---------------|--------|--------|---------|---------------------|
| Temperatura10 ¹ | 28,163 | 3,045 | 32,1 | 18,9 | 28,8 | 10,81 |
| Temperatura14 ² | 25,104 | 1,727 | 30,3 | 22,1 | 24,9 | 6,88 |
| Temperatura16 ³ | 19,293 | 0,717 | 20,8 | 17,5 | 19,2 | 3,71 |
| Umidade1 ⁴ | 31,876 | 2,751 | 36,7 | 27 | 32 | 8,63 |
| Umidade2 ⁵ | 30,896 | 2,587 | 36,2 | 25,4 | 31,2 | 8,37 |

^{1/} Temperatura10, Temperatura da copa da planta do café às 10 horas da manhã (°C); ^{2/} Temperatura14, Temperatura da copa da planta do café às 14:20 da tarde (°C); ^{3/} Temperatura16, Temperatura da copa da planta do café às 16:30 da tarde (°C); ^{4/} Umidade1, Umidade do solo no período da manhã (%); ^{5/} Umidade2, Umidade do solo no final da tarde (%); ^{6/} CV, Coeficiente de Variação.

Os valores de umidade do solo para os dois horários de medição foram elevados. Como toda produção de café da fazenda era feita sem irrigação, a necessidade de chuvas para uma boa produção era de suma importância. O elevado valor de umidade pode ser justificado pelo período chuvoso que antecedeu a coleta. O adensamento de plantas nas linhas de produção do café também favorecia a retenção de umidade no solo.

Os valores observados de umidade do solo para os dois horários mostraram ser bastante semelhantes, indicando que a área não possui uma variabilidade de umidade durante o dia. Para os talhões 1 e 2, os valores de umidade de solo coletados não apresentaram diferença estatística ao nível de 5% de significância entre os horários de coleta. Já o terceiro talhão houve diferença estatística entre os horários. O terceiro talhão possuía uma declividade menor e áreas com menor presença de plantas em comparação aos outros talhões, podendo justificar a diferença nos valores de umidade do solo. Outro fator que pode ter provocado diferença nos dados é o método de coleta da umidade do solo. Foi utilizado o aparelho FielScout TDR 300, que se caracteriza por medir a umidade exatamente no ponto em que é introduzido no solo.

A geração do mapa de umidade do solo na área é apresentada pela Figura 10. O mapa gerado foi utilizando os dados coletados pela manhã. O método de interpolação utilizado foi o do inverso do quadrado da distância, e foi realizado usando o programa de computador QGIS 3.0.

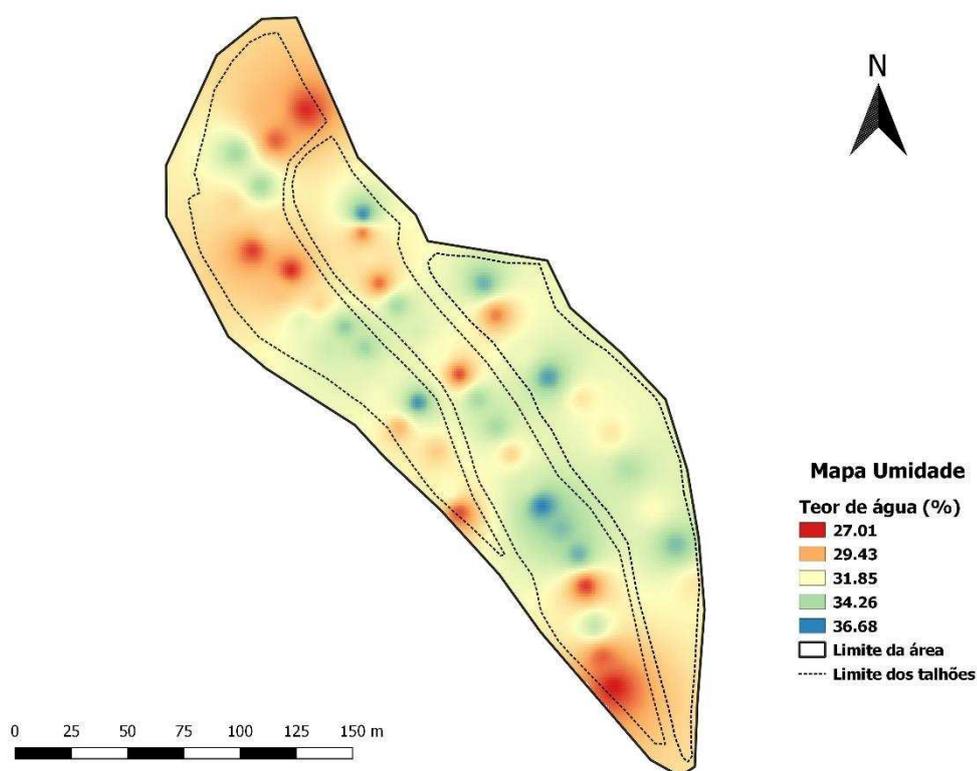


Figura 10. Mapa do teor de água no solo na área para coleta de dados realizada às 10:30 hs.

Com o elevado teor de água encontrado, pode-se afirmar que as plantas não estavam sob estresse hídrico. Com o solo úmido a planta tem sua necessidade hídrica suprida, não ocasionando alteração na regulação estomática. Porém, as variações de temperatura das plantas podem ser ocasionadas por outros fatores fisiológicos como doenças e ataque de pragas.

Na Tabela 3 são apresentados os valores do coeficiente de correlação de Pearson entre temperatura de cobertura e umidade do solo. Para todos valores de temperatura de cobertura e umidade do solo não houve correlação ao nível de 1% de significância. Já para a temperatura de cobertura às 14:20 hs com a umidade do solo às 16:30 hs houve correlação ao nível de 5% de significância, com P-valor de 0,026. Observou-se que para alguns pontos, tanto a temperatura quanto a umidade apresentavam valores elevados. Enquanto que o esperado, quando as plantas estão sob estresse hídrico, é se obter uma relação inversa entre temperatura e teor de água no solo. A falta de correlação e a baixa correlação em um horário pode ser explicada pela coleta ser em apenas um dia, sendo que a resposta da perda de água do solo para influenciar a planta pode levar alguns dias.

Tabela 3 – Correlação entre a temperatura de cobertura e umidade do solo para cada período de coleta.

| | Coeficiente de Correlação | |
|--|-----------------------------|-----------------------------|
| | Umidade do solo às 10:00 hs | Umidade do solo às 16:30 hs |
| Temperatura de cobertura determinada às 10:00 hs | 0,076 ^{ns} | -0,009 ^{ns} |
| Temperatura de cobertura determinada às 14:20 hs | -0,182 ^{ns} | -0,31* |
| Temperatura de cobertura determinada às 16:30 hs | 0,152 ^{ns} | 0,053 ^{ns} |

* Significativo ao nível de 0,05. ns = Não significativo.

4.3. Processamento das imagens obtidas pelo VANT

As imagens RGB de 640x480 obtidas pela câmera FLIR C2 apresentaram resolução suficiente para a geração do mosaico de toda área (Figura 11). A resolução espacial do mosaico obtido foi de 15,9 centímetros por pixel, detalhando bem a área imageada e facilitando a detecção de pontos

de controle em solo para o georreferenciamento. Este ortomosaico foi necessário para o georreferenciamento das imagens multibandas RGB e termal.

A câmera FLIR C2 apresentou boa qualidade no imageamento termal dos talhões, mesmo com uma resolução de 320x240 pixel por imagem e pontos em que a distância entre o VANT e a superfície era mais elevada, a câmera apresentou sensibilidade para detectar variabilidade da temperatura de cobertura. A Figura 11 mostra as imagens obtidas diretamente da câmera pelo programa FLIR Tools.

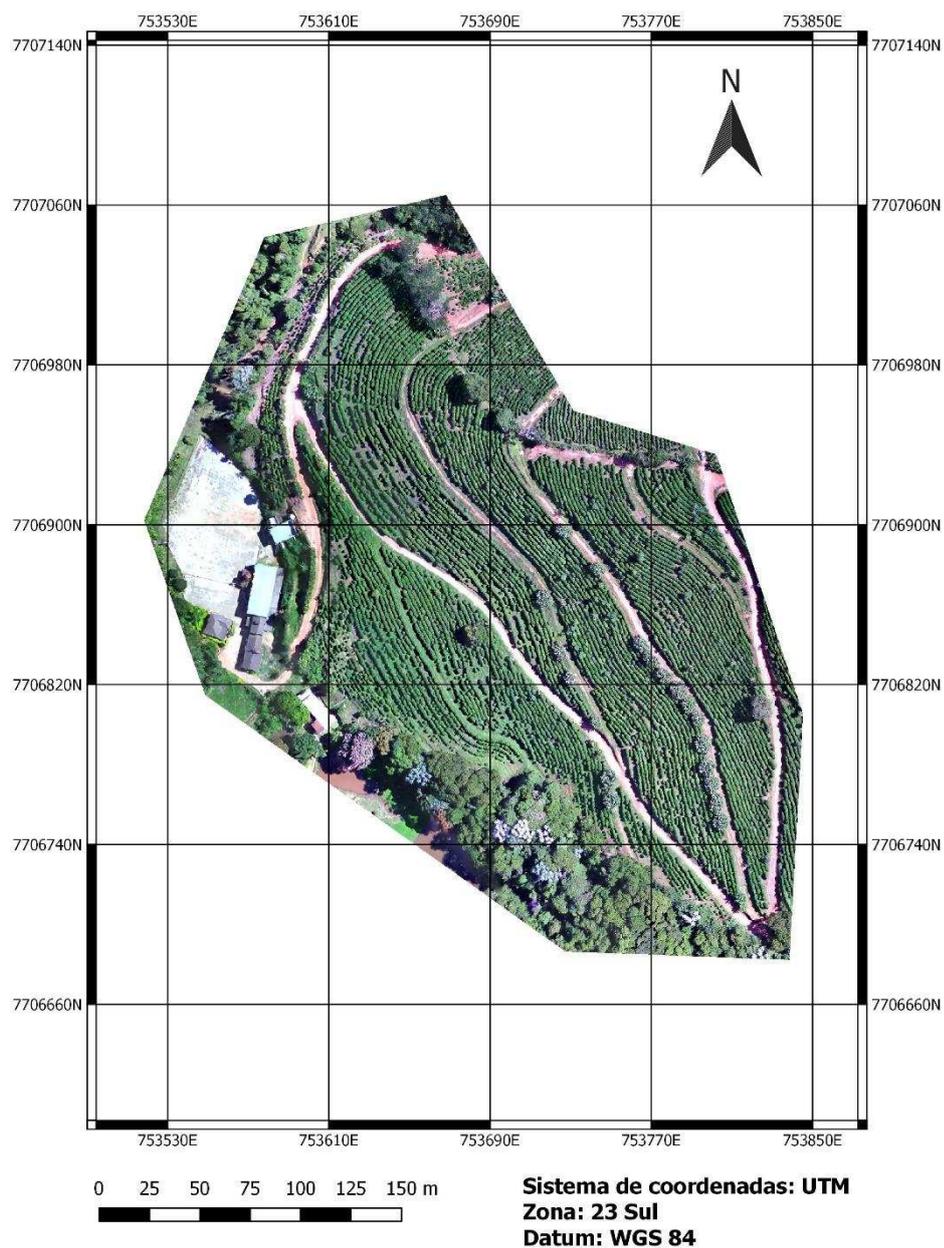


Figura 11. Mosaico georreferenciado gerado pelas imagens do VANT.

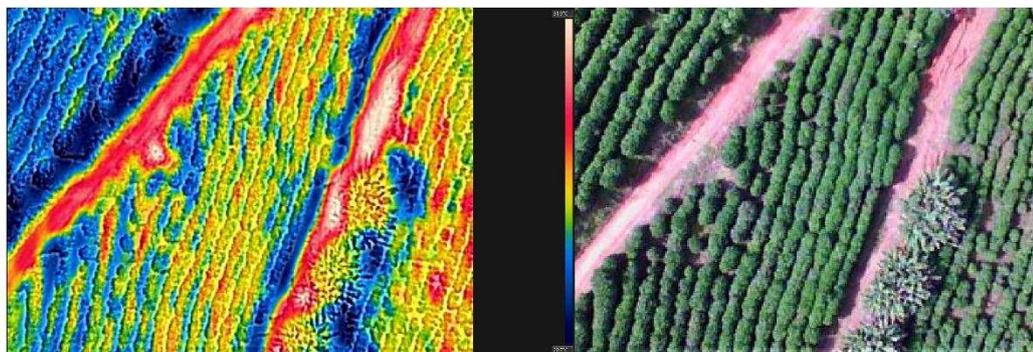


Figura 12. Imagem RGB à direita e termal à esquerda de uma mesma cena obtida às 10:00 horas.

As imagens termais geradas pela câmera FLIR C2 são obtidas com uma tecnologia da própria empresa, que fazia a junção de imagens RGB e termal, permitindo visualização das imagens com as características e formas da imagem RGB (Figura 12). Essa tecnologia facilitou a identificação dos locais de maior e menor temperatura na imagem. Pode-se notar a imagem termal pela Figura 12 a diferenciação de temperatura entre estradas, solo exposto, plantas e sombreamento, permitindo observar a variabilidade espacial da temperatura de cobertura na área.

Observando a Figura 12, alguns pontos na copa das plantas de café apresentaram uma temperatura mais elevada, uma incidência solar direta deve ter proporcionado a elevação da temperatura de cobertura. Já em regiões sombreadas pelas próprias plantas ou sombreadas por outras espécies de vegetação na região, a temperatura da copa das plantas apresentou valores mais baixos. Como a posição do sol para cada horário de imageamento era o mesmo nas coletas de temperatura em superfície e em voo, o sombreamento não afetou as análises.

Para o processamento das imagens termais foi obtida a matriz de temperatura de cobertura, referente a cada imagem, gerado pelo programa FLIR Tools e transformadas novamente em imagens pelo programa GNU Octave. Nesse processamento não ocorreu a perda de informação de temperatura de cobertura, apenas houve a transformação dos valores em milhar (por exemplo 23,3 foi convertido em 23300).

As características das imagens falsa cor obtidas pela união das imagens RGB e termal foram importantes para o georreferenciamento, tornando possível a visualização e localização de pontos nas imagens termais, geolocando-os em função do mosaico já georeferenciado. A partir da georreferenciação das imagens, os mapas termais foram desenvolvidos e apresentados nas Figuras 13, 14 e 15. A resolução espacial dos mapas teve valores diferenciados por estarem em região de elevada declividades, gerando diferentes altitudes nos talhões estudados. Todos voos foram fixados a uma altura de 50 metros do ponto de decolagem. O primeiro talhão, que estava mais próximo do local de decolagem, apresentou resolução de 16,1 centímetros por pixel. O segundo talhão apresentou uma resolução de 18,1 centímetros por pixel. Já no terceiro a resolução foi de 21,4 centímetros por

pixel. Essa diferença se deu devido a diferença de altura do VANT em relação ao solo para cada talhão. Somente para o primeiro talhão a distância entre o VANT e o solo ficou próxima ao valor programado de 50 metros. Com a declividade local, os outros talhões apresentaram uma distância vertical maior do que a altura de voo programada.

10:00 hs

Mapa Termal
Talhão 1

Mapa Termal
Talhão 2

Mapa Termal
Talhão 3

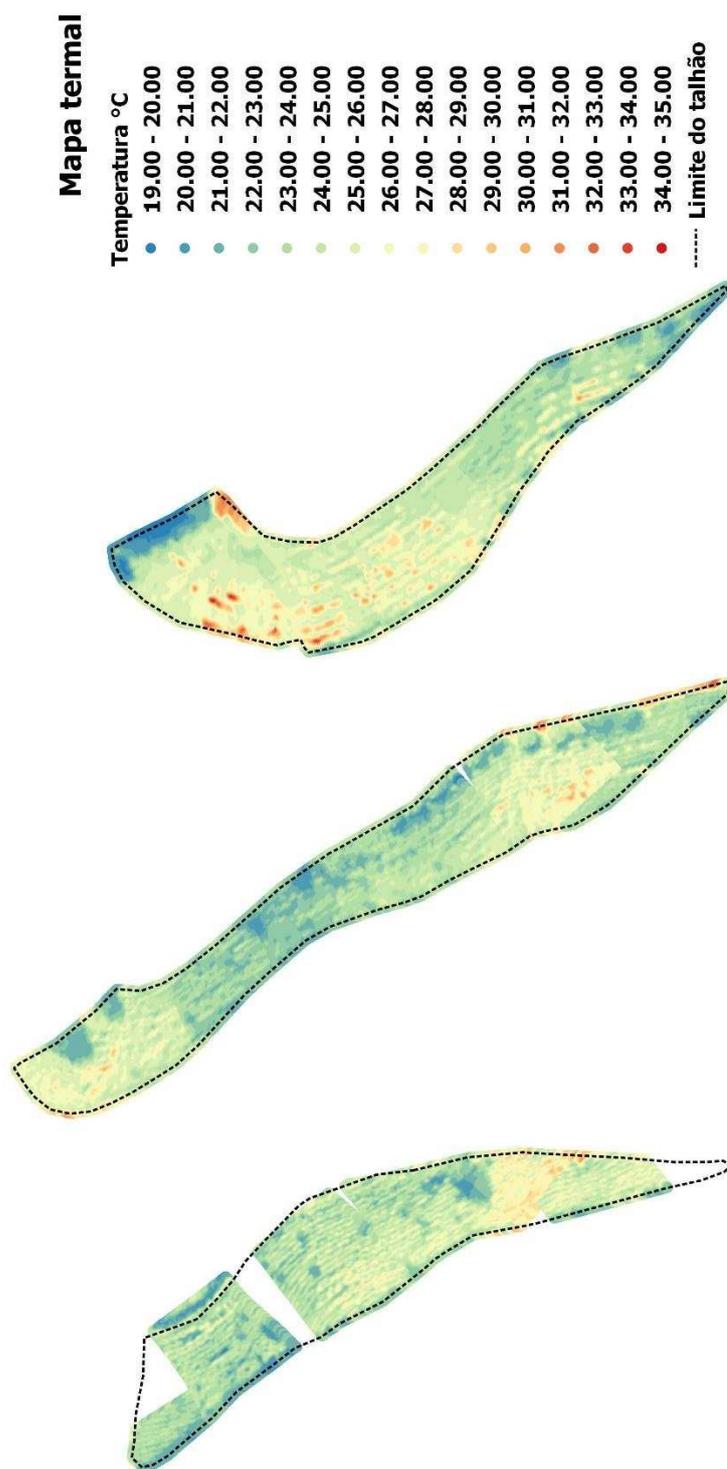


Figura 13. Mapas termais gerados para cada Talhão às 10:00 hs.

14:20 hs

Mapa Termal
Talhão 1

Mapa Termal
Talhão 2

Mapa Termal
Talhão 3

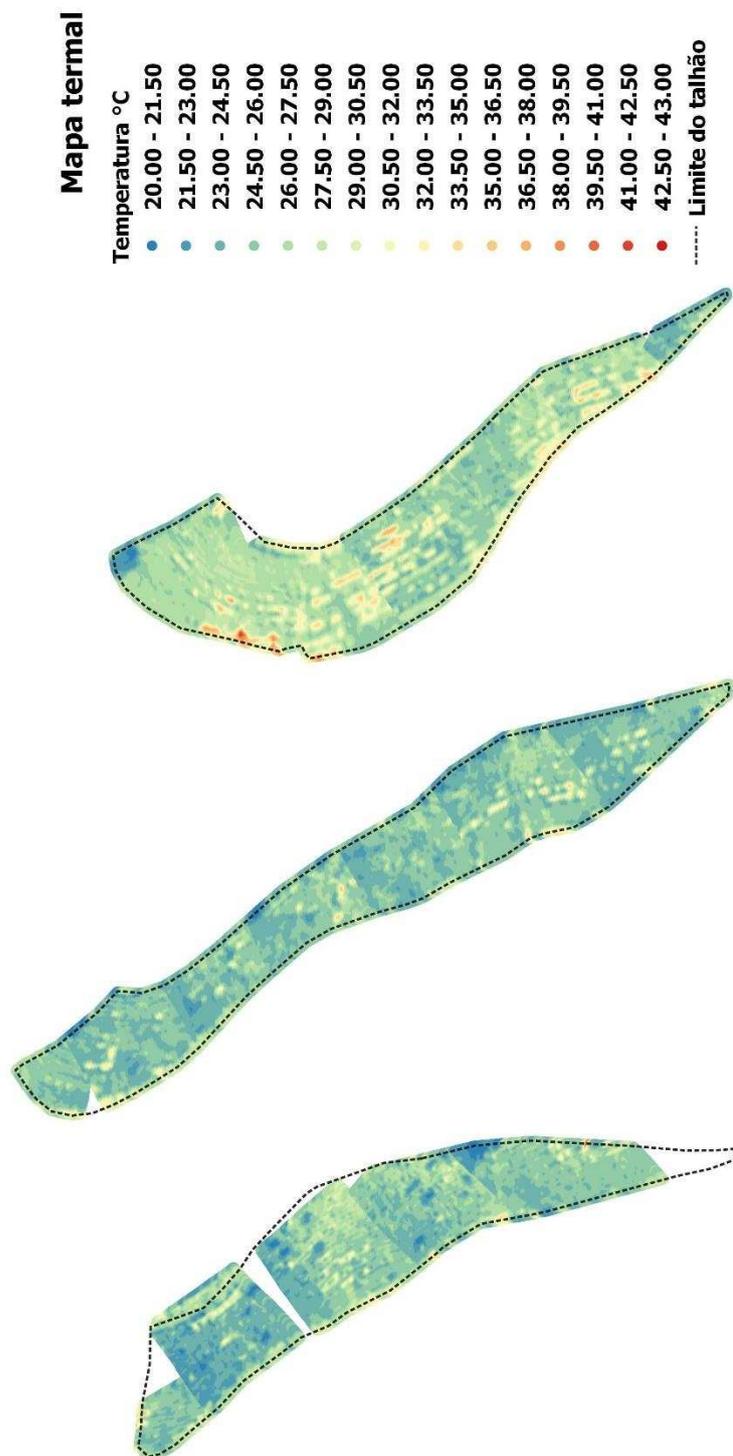


Figura 14. Mapas termais gerados para cada Talhão às 14:20 hs.

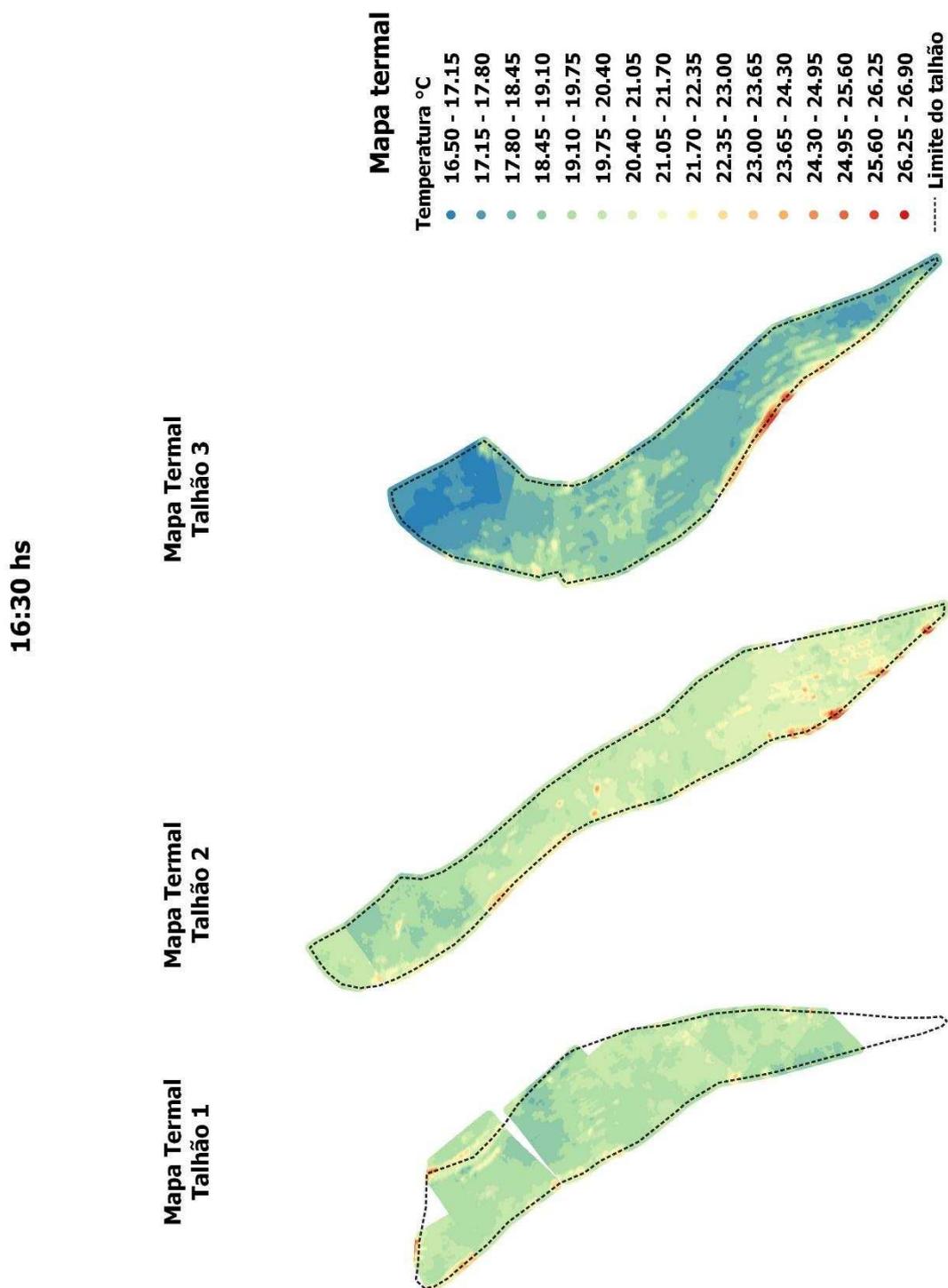


Figura 15. Mapas termais gerados para cada Talhão às 16:30 hs.

Os mapas termais gerados para o primeiro talhão apresentaram erro no mosaico para todas as três coletas de imagem realizadas (Figura 13, 14 e 15). A falha na aquisição de algumas imagens comprometeu a geração do

mosaico desse talhão. O sinal emitido pela controladora do VANT para o acionamento do servo que disparava a câmera pode ter falhado, não ocorrendo a aquisição de algumas imagens pela câmera. Uma possível solução para o problema seria o aumento da sobreposição das imagens, assim a perda de alguma imagem poderia não ser crucial na geração do mosaico de toda área. Uma outra possibilidade seria aumentar a altura de voo, aumentando a área imageada em cada imagem, porém essa solução provocaria uma diminuição na resolução das imagens. Como as imagens termais geram a temperatura por pixel, a geração dos mapas pelo programa QGIS pelo método de Raster virtual não necessitaria de imagens com grandes sobreposições, apenas o suficiente para a ligação entre elas.

As falhas na geração do mapa de temperatura de cobertura (Figura 13, 14 e 15) comprometeram a análise para as zonas de manejo do primeiro talhão. Entretanto, a identificação da variabilidade de temperatura assim como a comparação com os dados em campo não foi prejudicada, já que grande parte dos pontos coletados estavam presentes na região que foi imageada. A geração do modelo digital de elevação também não foi comprometida, já que as imagens para a geração do modelo foram obtidas de outro voo, assim como foi feito para o mosaico da área dos três talhões.

Os talhões 2 e 3, Figuras 13, 14 e 15, respectivamente, apresentaram pequenas falhas nos mapas, entretanto, isso não comprometeu nenhuma análise. Neste caso não houve falha na obtenção de imagens por falta de comando da controladora. A falta de sobreposição suficiente entre as imagens e possíveis desvios de rota ocasionado por ventos laterais pode ter ocasionado essas pequenas falhas.

É possível perceber a variabilidade da temperatura de cobertura ao longo dos talhões estudados, com grandes diferenças entres os horários imageados. No voo das 10:00 horas da manhã (Figura 13) uma maior quantidade de pontos apresentou elevada temperatura, isso ocorreu principalmente as áreas de solo exposto. Por outro lado, áreas com sombreamento por outras espécies de plantas geraram temperaturas mais amenas. Como nesse horário a temperatura ambiente apresentava valores mais baixos, a incidência solar direta nas folhas provocou uma grande variação na temperatura resultando em valores mais elevados de temperatura

de cobertura. Em contrapartida, em momentos da ausência de sol encoberto por nuvens a temperatura caía drasticamente. Por esse motivo, recomenda-se realizar a coleta de temperatura da copa das árvores em pleno sol ou em condição de cobertura total de nuvens para todos os pontos e em todos os horários, evitando a variabilidade de temperatura de cobertura causada pela variação da condição climática.

As temperaturas pela câmera termal FLIR no horário das 14:20 hs (Figura 14) apresentaram valores mais próximos com o esperado, obtendo temperaturas de cobertura mais elevadas em locais mais abertos e temperaturas de cobertura mais baixas em locais com vegetação. As 14:20 hs a temperatura ambiente é mais elevada, assim a planta tende a se aquecer, não apresentando grandes diferenças de temperatura em relação ao ar. Esses valores de temperatura pela câmera FLIR das 14:20 hs apresentaram uma melhor variabilidade térmica em suas áreas.

O imageamento realizado às 16:30 hs (Figura 15) mostrou valores mais amenos de temperatura de cobertura em comparação aos outros horários. Nesse momento o sol já estava ao horizonte, encoberto por um morro próximo a fazenda. Com essa situação, os valores de temperatura de cobertura não tiveram influência da radiação solar direta, apenas com temperatura ambiente.

4.4. Modelo Digital de Elevação

O modelo digital de elevação é uma informação importante na geração de zonas de manejo. Foram utilizados dois métodos de geração de MDE. No método 1 o MDE foi gerado por interpolação utilizando os pontos de altimetria obtido por GNSS. O modelo escolhido para a interpolação foi o TIN, do inglês, Triangular Irregular Network, utilizando o QGIS 3.0. Essa interpolação demonstrou ser mais adequada gerando um mapa mais uniforme. O método 2 de geração do MDE foi realizado utilizando as imagens RGB adquiridas pelo VANT e os seis pontos de controle na área. Na Figura 16 são mostrados os pontos georreferenciados utilizados na geração do MDE pelos dois métodos. O mapa de elevação foi recortado para mostrar o MDE apenas dos três talhões. Os MDEs são apresentados pela Figura 17.

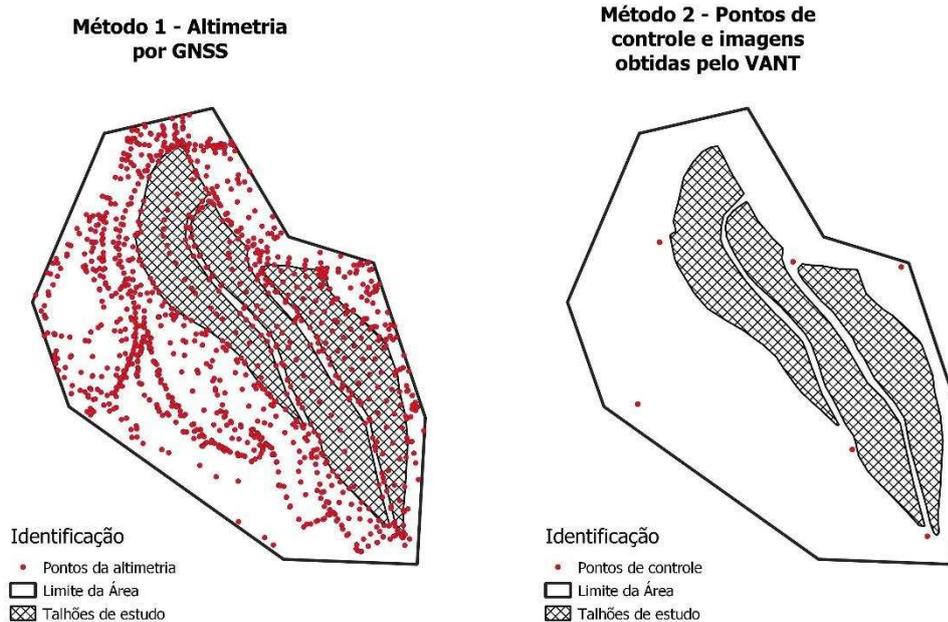


Figura 16. Número de pontos de elevação para cada método utilizado na geração do modelo digital de elevação.

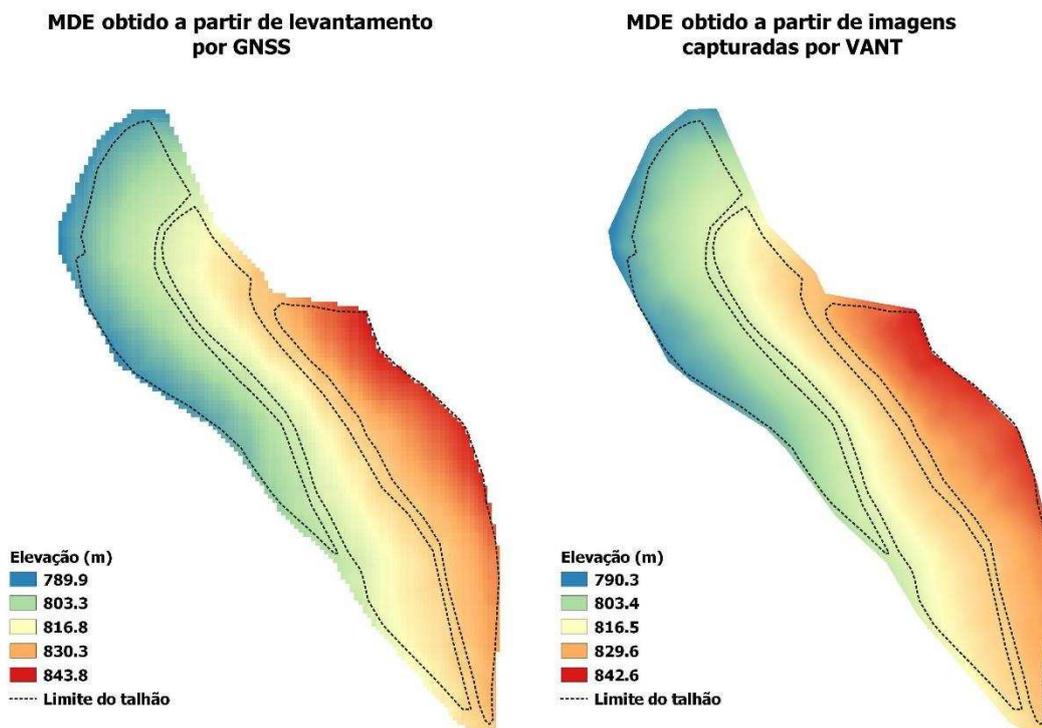


Figura 17. Modelos digitais de elevação obtidos por levantamento usando GNSS e por imagens adquiridas por câmeras acopladas ao VANT.

Analisando os MDE gerados (Figura 17), o MDE obtido a partir de imagens adquiridas pelo VANT apresentou uma alta resolução espacial. O tamanho de cada pixel nesse mapa foi de 0,16 metros. O MDE gerado a partir de levantamento por GNSS e por interpolação foi obtido utilizando 1148 pontos de elevação. O aparelho utilizado foi um GNSS com correção diferencial. A resolução do mapa obtido teve uma resolução de 2,30 metros por pixel.

Para a validação do MDE, gerado por imagens a partir do VANT, foi pego 350 pontos de altitude compreendidos na área da Figura 17, em ambos os MDE. Cada ponto de elevação dos MDE se relacionava com a mesma posição na área. Na Figura 18 é apresentado o gráfico de dispersão entre os pontos de elevação dos dois MDE.

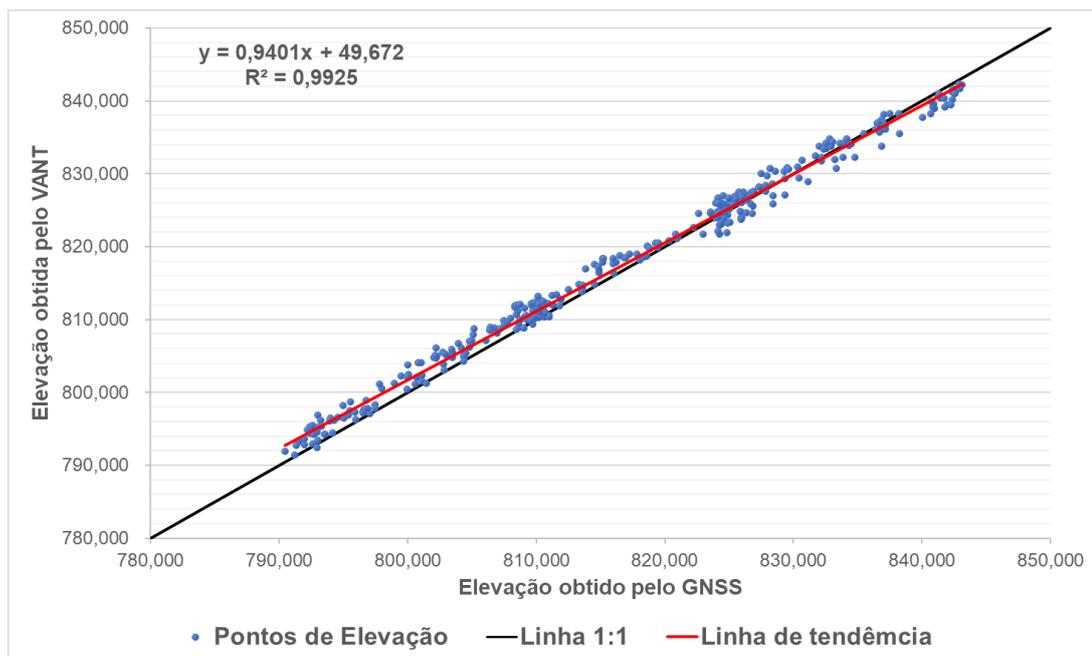


Figura 18. Gráfico de dispersão entre as elevações obtidas pelo VANT e GNSS

Os pontos se ajustam próximos a linha de correlação perfeita indicando uma elevada similaridade entre os métodos de geração do MDE. A linha de tendência dos pontos de elevação do VANT mostra um pequeno deslocamento em relação a linha 1:1 em altitudes mais baixas e mais próxima do alinhamento em altitudes maiores. As altitudes mais baixas correspondem a maior distância entre o VANT e a superfície. O erro associado a essa distância entre o VANT e a área imageada pode ser devido a resolução da câmera, mostrando uma possível causa para esse deslocamento. Essa análise dos pontos de elevação entre os dois métodos de geração de MDE indicou uma correlação de 0,996 e um R-Quadrado igual a 0,992, podendo assim, o método de geração de MDE pelo VANT ser aplicado para geração de MDE de áreas de difícil acesso.

4.5. Análise das temperaturas de cobertura pela câmera térmica e termômetro em campo

Na geração do mapa de temperatura de cobertura utilizando as imagens do sensor termal da câmera no VANT foi constatado a falha nos três horários de levantamento de dois pontos no talhão 1, ocasionado por falha no

imageamento. Esses dois pontos foram excluídos dos dados para todos os horários imageados pela impossibilidade de comparação entre os valores de temperatura dos sensores termais, o termômetro infravermelho e a câmera termal acoplado ao VANT. Ao final foram 49 pontos relacionando os valores de temperatura dos dois sensores termais em toda área estudada. A Tabela 4 mostra a estatística descritiva da comparação entre os dados obtidos pelos dois sensores.

Tabela 4. Estatística descritiva das temperaturas obtidas em campo pelo termômetro de radiação e pela câmera FLIR acoplada ao VANT

| Variáveis | Média | Desvio Padrão | Máximo | Mínimo | Mediana | CV ⁷ (%) |
|----------------------------|--------|---------------|--------|--------|---------|---------------------|
| Temperatura10 ¹ | 28,207 | 3,091 | 32,1 | 18,9 | 28,8 | 10,96 |
| Temperatura14 ² | 25,134 | 1,652 | 30,3 | 22,3 | 24,9 | 6,57 |
| Temperatura16 ³ | 19,273 | 0,731 | 20,8 | 17,5 | 19,2 | 3,79 |
| Aereo10 ⁴ | 24,366 | 1,618 | 28,6 | 20,8 | 24,7 | 6,64 |
| Aereo14 ⁵ | 25,433 | 1,091 | 27,8 | 22,9 | 25,3 | 4,29 |
| Aereo16 ⁶ | 19,165 | 1,112 | 21,6 | 17 | 19,1 | 5,80 |

^{1/} Temperatura10, Temperatura da copa da planta do café às 10 horas da manhã (°C); ^{2/} Temperatura14, Temperatura da copa da planta do café às 14:20 da tarde (°C); ^{3/} Temperatura16, Temperatura da copa da planta do café às 16:30 da tarde (°C); ^{4/} Aereo10, Temperatura da copa da planta do café às 10:00 da manhã pela câmera termal acoplada ao VANT(°C); ^{5/} Aereo14, Temperatura da copa da planta do café às 14:20 da tarde pela câmera termal acoplada ao VANT(°C); ^{6/} Aereo16, Temperatura da copa da planta do café às 16:30 da tarde pela câmera termal acoplada ao VANT(°C); ^{7/} CV, Coeficiente de Variação.

Nos dados apresentados na Tabela 4, nota-se uma pequena diferença entre os dados de Temperatura10, Temperatura14 e Temperatura16 com os dados de Temperatura10, Temperatura14 e Temperatura16 da Tabela 2. A diferença nos dados de temperatura entre as Tabelas 2 e 4 acontece pela eliminação dos dois pontos do talhão 1.

Os valores das temperaturas coletados as 10 horas são os que apresentaram maior diferença entre o levantamento aéreo e o levantamento terrestre. O valor mais baixo da temperatura ambiente neste horário pode ter gerado uma maior diferença entre os sensores de coleta de temperatura, já que o termômetro infravermelho coletava a temperatura mais próxima do alvo enquanto a câmera termal coletava a temperatura a uma maior distância do alvo. Com a incidência solar direta nas folhas a temperatura do ar ao seu redor rapidamente se modificava tornando-o mais quente próximo as folhas. Esse ar mais quente juntamente com a folha aquecida pela incidência solar era

captado pelo sensor do termômetro infravermelho, resultado em valores mais elevados. Já entre a câmera térmica acoplado ao VANT e as folhas, a temperatura da grande quantidade de massa de ar se modificava mais lentamente, resultando em uma temperatura captada pela câmera mais amena. Essa diferença é notada analisando os valores mínimos e máximos dos dois sensores.

Nas coletas de temperatura realizadas às 14:20 hs e às 16:30 hs verificou-se uma menor diferença entre as temperaturas determinadas pela câmera termal acoplada ao VANT e as obtidas pelo sensor terrestre. Nesses horários havia um maior equilíbrio entre planta e ar, sendo que às 14:20 as plantas e o ar estavam mais aquecidos pela radiação solar, e às 16:30 hs a temperatura do ar e das folhas apresentavam menor temperatura pela menor radiação solar direta.

Os gráficos de dispersão entre os valores de temperaturas obtidos pela câmera FLIR acoplada ao VANT e pelo sensor terrestre são apresentados pela Figura 19. Observou-se uma maior similaridade entre a linha de tendência dos pontos de temperatura e a linha 1:1 no diagrama das 14:20 hs. Isso significa que nesse horário houve uma maior concordância entre as temperaturas obtidas pelos dois tipos de sensores. Já para os outros horários os pontos se mostraram mais dispersos, mostrando uma menor concordância entre os valores obtidos pelos sensores.

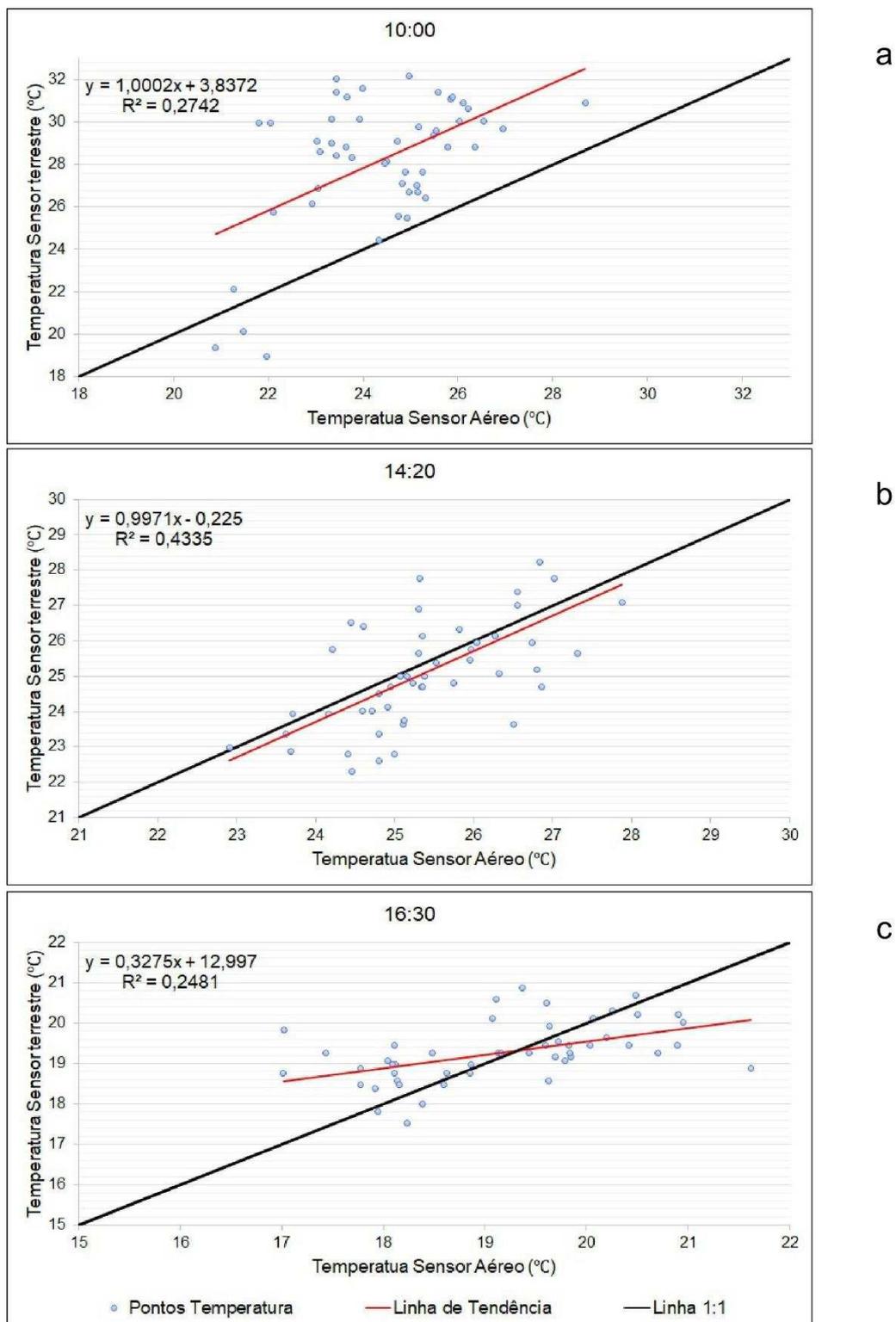


Figura 19. Gráfico de dispersão entre temperatura de cobertura obtida pela câmera com sensor termal acoplado ao VANT e a temperatura obtida pelo sensor terrestre nos três talhões: a) horário 10:00; b) horário 14:20; c) horário 16:30.

Os dados de correlação para cada horário assim como o erro absoluto médio e RMSE foram usados a fim de selecionar um horário mais adequado para o imageamento da área e assim gerar informações mais precisas da temperatura de cobertura. Os valores de temperatura de cobertura pela câmera termal obtidos às 14:20 hs apresentaram maior correlação com os valores de temperatura obtidos pelo termômetro infravermelho. Nesse horário, a correlação foi de 65,84%, diferença absoluta média de 0,039°C e RMSE igual a 1,234 entre os dois métodos de medição (Tabela 5). Esse resultado tem como base o tempo de exposição do sol e ao possível equilíbrio térmico entre a superfície e ao ar, tornando o horário das 14:20 o melhor, entre os testados, para representar a temperatura de superfície.

Tabela 5. Correlação e diferença absoluta média entre as temperaturas de cobertura obtidas pela câmera FLIR acoplada ao VANT e as obtidas pelo sensor terrestre.

| Horário de coleta de dados | Correlação (%) | Diferença absoluta média (°C) | RMSE |
|----------------------------|----------------|-------------------------------|-------|
| 10:00 hs | 52,36* | 0,140 | 2,606 |
| 14:20 hs | 65,84* | 0,039 | 1,234 |
| 16:30 hs | 49,80* | 0,038 | 1,917 |

* Significativos ao nível de 0,01.

O horário de 14:20 hs apresentou o melhor resultado em relação aos outros horários, mas não resultou em uma correlação próxima a 100% que indicaria uma maior similaridade nos valores de temperatura. Uma possibilidade de obter melhora na correlação dos valores de temperatura seria uma redução na altura do sensoriamento termal, já que a câmera utilizada possuía uma baixa resolução. A dificuldade de coletar as temperaturas em solo ao mesmo tempo do voo do VANT também pode resultar em diferenças nos valores de temperatura. Um pequeno atraso na coleta de informações pode resultar em valores distintos entre os sensores termais, já que uma cobertura momentânea por nuvens ou rajadas de ventos podem mudar o resultado coletado. Durante a coleta, apenas foi observado mudanças nas condições de ventos nos talhões, podendo também ser umas das possíveis causas na diferença de temperatura entre os sensores.

4.6. Delimitação das zonas de manejo

As zonas de manejo foram geradas a partir dos mapas de umidade do solo, temperatura de cobertura obtida por câmera termal acoplado ao VANT no horário em que apresentou maior correlação com a temperatura obtida por sensor terrestre e do MDE obtido a partir de imageamento utilizando câmera RGB acoplada ao VANT. Os três talhões foram analisados separadamente a fim de eliminar áreas como carreadores e estradas. Apenas para dois talhões dos três estudados foram possíveis a geração das zonas de manejo, sendo eles os talhões 2 e 3. O talhão 1 não foi utilizado pois a falha na geração do mosaico provocou a perda de informações de temperatura de cobertura.

As informações dos três mapas (umidade do solo, temperatura de cobertura e MDE) foram transferidas para uma tabela com todos os valores obtidos. Essa tabela tinha informações de cada ponto imageado, sendo que cada mapa resultou em mais de 300 mil dados. Com 300 mil dados, o programa FuzMe não foi capaz de gerar as zonas de manejo, assim, houve a necessidade da seleção de dados para o processamento das zonas de manejo, obtendo ao final da extração cerca de 40 mil dados para cada talhão. Essa seleção de dados foi realizada da maneira mais regular possível a fim de não perder informações das variáveis. A cada três pixel em sequência foi selecionado o central, sendo repetido até atingir cerca de 40 mil. As zonas de manejo foram geradas (Figura 20), processando 40 mil dados, pelo algoritmo fuzzy k means, obtendo os mapas com resolução média de 0,80 metros por pixel.

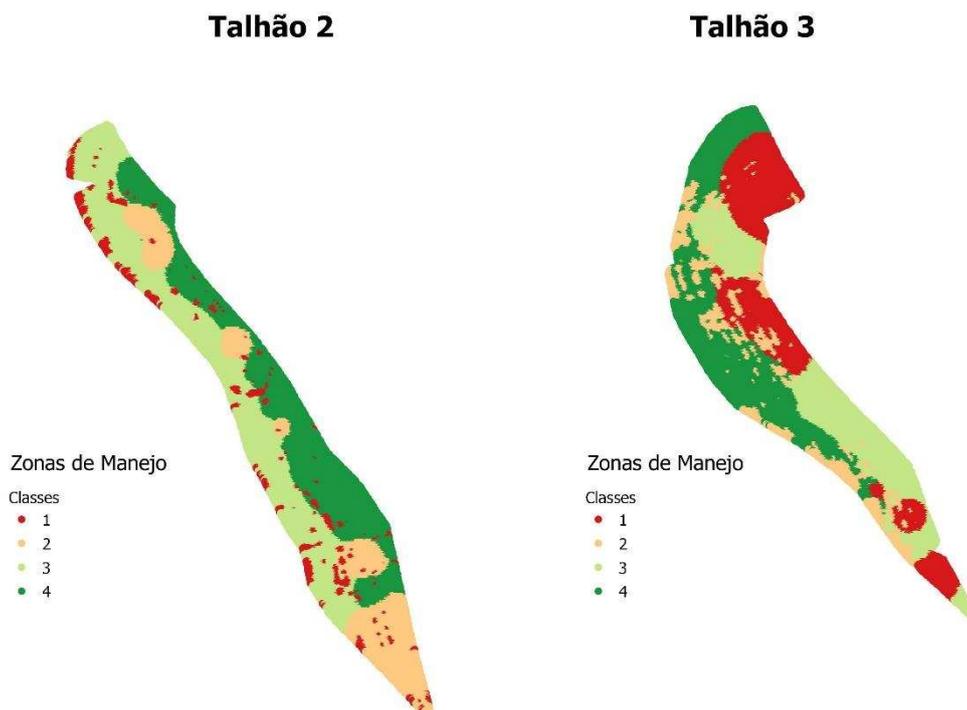


Figura 20. Zonas de Manejo em relação a temperatura de cobertura, umidade do solo e MDT dos talhões.

A utilização de quatro classes das zonas de manejo foi a que melhor classificou os dois talhões. Para essa análise foi utilizado o Índice de Performance Fuzzy (FPI – “Fuzzyness Performance Index”) e a Entropia da Partição Modificada (MPE – “Modified Partition Entropy”), sendo que o FPI estimava o grau de separação dos membros em diferentes classes e o MPE estimava o grau de desorganização criada pelo número de zonas. Estes índices apresentam valores entre 0 e 1, o número de zonas de manejo ótimo foi obtido quando ambos os índices são minimizados (Song et al. 2009).

Para a delimitação das zonas de manejo de cada talhão, uma tabela com a média dos valores das variáveis para cada classe foi gerada. As Tabelas 6 e 7 foram geradas para as classes definidas para os talhões 2 e 3, respectivamente.

Tabela 6. Valores médios de cada classe do Talhão 2

| Classes | Altitude (m) | Temperatura de Cobertura (° C) | Umidade do Solo (% b.s.) |
|---------|--------------|--------------------------------|--------------------------|
| 1 | 816,6 | 29,37 | 31,94 |
| 2 | 820,9 | 24,86 | 29,77 |
| 3 | 815,2 | 24,85 | 31,94 |
| 4 | 821,8 | 24,65 | 33,15 |

Tabela 7. Valores médios de cada classe do Talhão 3

| Classes | Altitude (m) | Temperatura de Cobertura (° C) | Umidade do Solo (% b.s.) |
|---------|--------------|--------------------------------|--------------------------|
| 1 | 806,7 | 26,51 | 29,88 |
| 2 | 801,1 | 31,73 | 30,93 |
| 3 | 805,6 | 26,59 | 32,79 |
| 4 | 798,3 | 26,22 | 31,07 |

Observa-se pela Tabela 6 que a classe 1 do talhão 2 apresentou maior valor de temperatura de cobertura mesmo apresentado uma umidade de solo mais elevada. As regiões de maior temperatura caracterizados pela classe 1 são representados pelas zonas de manejo geradas para o talhão 2 na Figura 20 ao longo de toda aérea. Essas regiões de maior temperatura representada pela classe 1 podem indicar possíveis problemas termais nas plantas. Outro fator que pode explicar uma maior temperatura nessas regiões da classe 1 são as falhas de plantas nas linhas de plantio, expondo o solo a radiação solar direta. O mesmo se observa no Talhão 3 pela Tabela 7.

No talhão 3 (Tabela 7) observa-se um valor de temperatura elevado na classe 2, possuindo uma umidade do solo elevada, similar ao encontrado no talhão 2. Valores de temperatura de algumas plantas que aparentemente se distanciam da temperatura do restante das plantas com valores mais elevados tornam-se regiões de atenção, sendo que plantas sadias a abertura e fechamento dos estômatos nas folhas proporcionam a regulação térmica igualmente para cada planta. Essa regulação estomática torna a temperatura das plantas mais próxima uma das outras em todo talhão, sendo observado pelas classes 1, 3 e 4. Já a classe 2 se difere possuindo um alto valor de temperatura. Manejo e cuidados nas regiões específicas de alteração térmica

podem ser tomadas a partir dessas informações de temperatura, tornando importantes as informações coletadas e processadas em zonas de manejo.

5. CONCLUSÕES

O sistema de captura das imagens aéreas acoplado ao VANT mostrou ser eficiente em disparar a câmera termal com 4 segundos entre cada disparo. O número de imagens foi apenas limitado pelo tempo de obtenção da imagem da câmera. A câmera termal detectou a variabilidade termal dos talhões mesmo possuindo uma baixa resolução espacial em suas imagens.

Todo processamento das imagens termais mostrou existência de variabilidade de temperatura de cobertura nos talhões, principalmente identificando regiões de solo exposto e de áreas com sombreamento. A união de bandas das imagens tornou possível o georreferenciamento das imagens termais e a geração de mosaicos da temperatura de cobertura. Entre os horários de coleta de imagens: 10:00 hs, 14:20 hs e 16:30 hs, o imageamento termal realizado às 14:20 da tarde foi o que apresentou uma melhor correlação entre a temperatura de cobertura obtida pelo VANT e a temperatura obtida por sensor em solo.

Neste trabalho, a variabilidade de temperatura nos talhões mostrou não ser afetada pela umidade do solo. Possuindo pontos de temperatura de cobertura elevada em áreas de alta umidade e pontos de temperatura mais amena em regiões de umidade mais baixa. Os valores de umidade de solo para dois talhões não variaram em dois horários distintos, mostrando que para essas áreas a umidade continuou constante durante todo dia.

Os modelos digitais de elevação (MDE) obtidos por coleta de dados usando Sistema Global de Navegação por Satélite (GNSS) e obtidos por imageamento a partir do VANT apresentaram uma correlação de 0,996. O VANT é eficiente para geração de modelos digitais de elevação de áreas de difícil acesso.

As zonas de manejo para os talhões conseguiram diferenciar pontos de temperatura de cobertura mais elevadas e podendo assim identificar problemas na cultura causados por algum estresse termal.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bulanon, D. M., Burks, T. F., e Alchanatis, V. 2008. "Study on Temporal Variation in Citrus Canopy Using Thermal Imaging for Citrus Fruit Detection." *Biosystems Engineering* 101 (2). IAgRE: 161–71. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.08.002>.
- Burkart, A., Aasen, H., Alonso, L., Menz, G., Bareth, G., e Rascher, U. 2015. "Angular Dependency of Hyperspectral Measurements over Wheat Characterized by a Novel UAV Based Goniometer." *Remote Sensing* 7 (1): 725–46. <https://doi.org/10.3390/rs70100725>.
- Calderón, R., Navas-Cortés, J. A., Lucena, C., e Zarco-Tejada, P. J. 2013. "High-Resolution Airborne Hyperspectral and Thermal Imagery for Early Detection of Verticillium Wilt of Olive Using Fluorescence, Temperature and Narrow-Band Spectral Indices." *Remote Sensing of Environment* 139. Elsevier Inc.: 231–45. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.07.031>.
- Cohen, Y., Alchanatis, V., Saranga, Y., Rosenberg, O., Sela, E. e Bosak, A. 2017. "Mapping Water Status Based on Aerial Thermal Imagery: Comparison of Methodologies for Upscaling from a Single Leaf to Commercial Fields." *Precision Agriculture* 18 (5). Springer US: 801–22. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9484-3>.
- Colomina, I., e Molina, P. 2014. "Unmanned Aerial Systems for Photogrammetry and Remote Sensing: A Review." *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 92. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Inc. (ISPRS): 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.02.013>.
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). 2017. "Acompanhamento Da Safra Brasileira: Café." *Monitoramento Agrícola- Safra 2017* 4 (1): 1–98. <https://doi.org/ISSN 2318-6852>.
- Córdoba, M. A., Bruno, C. I., Costa, J. L., Peralta, N. R., e Balzarini, M. G.

2016. "Protocol for Multivariate Homogeneous Zone Delineation in Precision Agriculture." *Biosystems Engineering* 143: 95–107. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.12.008>.
- Detar, W. R., Penner, J. V., e Funk, H. A. 2006. "Airborne Remote Sensing to Detect Plant Water Stress in Full Canopy Cotton." *Transactions of the Asabe* 49 (3): 655–65.
- Teixeira Fernandes, A. L., Partelli, F. L., Bonomo, R., e Golynski, A. 2012. "A Moderna Cafeicultura Dos Cerrados Brasileiros." *Pesquisa Agropecuária Tropical* 42 (2): 231–40. <https://doi.org/10.1590/S1983-40632012000200015>.
- Gebbers, R., e Adamchuk, V. I. 2010. "Precision Agriculture Food Security." *Precision Agriculture and Food Security* 327 (5967): 828–31.
- Gómez-Candón, D., Castro, A. I. e López-Granados, F. 2014. "Assessing the Accuracy of Mosaics from Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery for Precision Agriculture Purposes in Wheat." *Precision Agriculture* 15 (1): 44–56. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9335-4>.
- Gonzalez-Dugo, V., Zarco-Tejada, P., Nicolás, E., Nortes, P. A., Alarcón, J. J., Intrigliolo, D. S., e Fereres, E. 2013. "Using High Resolution UAV Thermal Imagery to Assess the Variability in the Water Status of Five Fruit Tree Species within a Commercial Orchard." *Precision Agriculture* 14 (6): 660–78. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9322-9>.
- Haboudane, D., J. R. Miller, N. Tremblay, P. Zarco-Tejada, e L. Dextraze. 2002. "Integrated Narrow-Band Vegetation Indices for Prediction of Crop Chlorophyll Content for Application to Precision Agriculture." *Remote Sensing of Environment* 81 (2–3): 416–26. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00018-4).
- Herwitz, S. R., L. F. Johnson, S. E. Dunagan, R. G. Higgins, D. V. Sullivan, J. Zheng, B. M. Lobitz, et al. 2004. "Imaging from an Unmanned Aerial Vehicle: Agricultural Surveillance and Decision Support." *Computers and Electronics in Agriculture* 44 (1): 49–61.

<https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.02.006>.

Honkavaara, E., H. Saari, J. Kaivosoja, I. Pölönen, T. Hakala, P. Litkey, J. Mäkyänen, e L. Pesonen. 2013. "Processing and Assessment of Spectrometric, Stereoscopic Imagery Collected Using a Lightweight UAV Spectral Camera for Precision Agriculture." *Remote Sensing* 5 (10): 5006–39. <https://doi.org/10.3390/rs5105006>.

Hunt, E. Raymond, e Craig S.T. Daughtry. 2017. "What Good Are Unmanned Aircraft Systems for Agricultural Remote Sensing and Precision Agriculture?" *International Journal of Remote Sensing* 00 (00). Taylor & Francis: 1–32. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1410300>.

ICO (International Coffee Association). 2016. "International Coffee Organization - The Current State of the Global Coffee Trade | #CoffeeTradeStats." Acedido a 15 de Maio de 2016. http://www.ico.org/pt/trade_statistics.asp.

Idso, S. B., R. D. Jackson, W. L. Ehrler, e S. T. Mitchell. 1969. "A Method for Determination of Infrared Emittance of Leaves". *Ecological Society of America* 50 (5): 899–902.

Jackson, R. D., S. B. Idso, R. J. Reginato, e P. J. Pinter. 1981. "Canopy Temperature as a Crop Water Stress Indicator." *Water Resources Research* 17 (4): 1133–38. <https://doi.org/10.1029/WR017i004p01133>.

K. C. Swain, S. J. Thomson, H. P. W. Jayasuriya. 2010. "Adoption of an Unmanned Helicopter for Low-Altitude Remote Sensing To Estimate Yield and Total Biomass of a Rice Crop." *American Society of Agricultural and Biological Engineers* 53 (1): 21–27. <https://doi.org/10.13031/2013.29493>.

Khanal, S., J. F., e S. Shearer. 2017. "An Overview of Current and Potential Applications of Thermal Remote Sensing in Precision Agriculture." *Computers and Electronics in Agriculture* 139. Elsevier B.V.: 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.05.001>.

- Kozak, J. A., R. M. Aiken, G. N. Flerchinger, D. C. Nielsen, L. Ma, e L. Ahuja. 2007. "Comparison of Modeling Approaches to Quantify Residue Architecture Effects on Soil Temperature and Water." *Soil and Tillage Research* 95 (1–2): 84–96. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.11.006>.
- Kravchenko, A. N., e Donald G. Bullock. 2000. "Correlation of Corn and Soybean Grain Yield with Topography and Soil Properties." *Agronomy Journal* 92 (1): 75–83. <https://doi.org/10.2134/agronj2000.92175x>.
- Lan, Y.; Huang, Y. e Hoffmann, W.C. 2007. "Airborn Multispectral Remote Sensing with Ground Truth for Areawide Pest Management" 0300 (08).
- Landis, J. R., e G. G. Koch. 1977. "The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data." *International Biometric Society* 33 (1): 159–74.
- Lass, L. W., T. S. Prather, N. F. Glenn, K. T. Weber, J. T. Mundt, e J. Pettingill. 2005. "A Review of Remote Sensing of Invasive Weeds and Example of the Early Detection of Spotted Knapweed (*Centaurea Maculosa*) and Babysbreath (*Gypsophila Paniculata*) with a Hyperspectral Sensor." *Weed Science* 53 (2): 242–51. <https://doi.org/10.1614/WS-04-044R2>.
- Lelong, Camille C.D., P. Burger, G. Jubelin, B. Roux, S. Labbé, e F. Baret. 2008. "Assessment of Unmanned Aerial Vehicles Imagery for Quantitative Monitoring of Wheat Crop in Small Plots." *Sensors* 8 (5): 3557–85. <https://doi.org/10.3390/s8053557>.
- Lindblom, J., C. Lundström, M. Ljung, e A. Jonsson. 2017. "Promoting Sustainable Intensification in Precision Agriculture: Review of Decision Support Systems Development and Strategies." *Precision Agriculture* 18 (3): 309–31. <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9491-4>.
- Meer, Freek van der. 2012. "Remote-Sensing Image Analysis and Geostatistics." *International Journal of Remote Sensing* 33 (18): 5644–76. <https://doi.org/10.1080/01431161.2012.666363>.

- Molin, José Paulo, e C. N. de Castro. 2008. "Establishing Management Zones Using Soil Electrical Conductivity And Other Soil Properties By The Fuzzy Clustering Technique." *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)* 65 (December): 567–73. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162008000600001>.
- Moshou, D., C. Bravo, R. Oberti, J. S. West, H. Ramon, S. Vougioukas, e D. Bochtis. 2011. "Intelligent Multi-Sensor System for the Detection and Treatment of Fungal Diseases in Arable Crops." *Biosystems Engineering* 108 (4). IAgRE: 311–21. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2011.01.003>.
- Nebiker, S., A. Annen, M. Scherrer, e D. Oesch. 2008. "A Light-Weight Multispectral Sensor for Micro Uav – Opportunities for Very High Resolution Airborne Remote Sensing." *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XXXVII*: 1193–1200.
- Nonami, K., F. Kendoul, W. Wang, e D. Nakazawa. 2010. *Autonomous Flying Robots*. Tokyo: Springer.
- Oborne, M. 2013. "Mission planner software".
- Pedroso, M., J. Taylor, B. Tisseyre, B. Charnomordic, e S. Guillaume. 2010. "A Segmentation Algorithm for the Delineation of Agricultural Management Zones." *Computers and Electronics in Agriculture* 70 (1): 199–208. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2009.10.007>.
- Prakash, Anupma. 2000. "Thermal Remote Sensing: Concepts, Issues and Applications." *Archives of Photogrammetry and Remote Sensing XXXIII*: 239–43.
- Primicerio, J., S. F. Di Gennaro, E. Fiorillo, L. Genesio, E. Lugato, A. Matese, e F. P. Vaccari. 2012. "A Flexible Unmanned Aerial Vehicle for Precision Agriculture." *Precision Agriculture* 13 (4): 517–23. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9257-6>.

- Rango, A., A. Laliberte, J. E. Herrick, C. Winters, K. Havstada, C. Steeleb, e D. Browning. 2009. "Unmanned Aerial Vehicle-Based Remote Sensing for Rangeland Assessment, Monitoring, and Management." *Journal of Applied Remote Sensing* 3 (1): 033542. <https://doi.org/10.1117/1.3216822>.
- Roemer, C., M. Wahabzada, A. Ballvora, F. Pinto, M. Rossini, C. Panigada, J. Behmann, et al. 2012. "Early Drought Stress Detection in Cereals: Simplex Volume Maximization for Hyperspectral Image Analysis." *Functional Plant Biology* 39: 878–90. <https://doi.org/10.1071/FP12060>.
- Schmale, D. G., Dingus, B. R., e Reinholtz, C. 2008. "Development and Application of an Autonomous Unmanned Aerial Vehicle for Precise Aerobiological Sampling above Agricultural Fields." *Journal of Field Robotics* 25 (3): 133–47. <https://doi.org/10.1002/rob.20232>.
- Shafian, S., e Maas, S. J. 2015. "Index of Soil Moisture Using Raw Landsat Image Digital Count Data in Texas High Plains." *Remote Sensing* 7 (3): 2352–72. <https://doi.org/10.3390/rs70302352>.
- Song, X., Wang, J., Huang, W., Liu, L., Yan, G., e Pu, R. 2009. "The Delineation of Agricultural Management Zones with High Resolution Remotely Sensed Data." *Precision Agriculture* 10 (6): 471–87. <https://doi.org/10.1007/s11119-009-9108-2>.
- Swain, K. C. 2007. "Suitability of Low-Altitude Remote Sensing Images for Estimating Nitrogen Treatment Variations in Rice Cropping for Precision Agriculture Adoption." *Journal of Applied Remote Sensing* 1 (1): 013547. <https://doi.org/10.1117/1.2824287>.
- Sylbersztajn, D., e Farina, E. M. M. Q. 2001. "Projeto: Diagnóstico Sobre o Sistema Agroindustrial de Cafés Especiais e Qualidade Superior Do Estado de Minas Gerais". São Paulo: Pensa/Sebrae.
- SYSTEM FLIR. 2016. "FLIR C Series." FLIR® Systems. 2016.
- Tanner, C. B. 1963. "Plant Temperatures¹." *Agronomy Journal* 55 (2): 210.

<https://doi.org/10.2134/agronj1963.00021962005500020043x>.

- Torres-Sanchez, J., Pena, J. M., Castro, A. I., e Lopez-Granados, F. 2014. "Multi-Temporal Mapping of the Vegetation Fraction in Early-Season Wheat Fields Using Images from UAV." *Computers and Electronics in Agriculture* 103: 104–13. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.02.009>.
- Valente, D. S. M., Queiroz, D. M., Pinto, F. A. C., Santos, N. T., e Santos, F. L. 2012. "Definition of Management Zones in Coffee Production Fields Based on Apparent Soil Electrical Conductivity." *Scientia Agricola* 69 (3): 173–79. <https://doi.org/10.1590/S0103-90162012000300001>.
- Wang, D., Zhang, G., Zhao, M., Pan, X., Zhao, Y., Li, D., e Macmillan, B. 2015. "Retrieval and Mapping of Soil Texture Based on Land Surface Diurnal Temperature Range Data from MODIS." *Plos One* 10 (6): e0129977. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0129977>.
- Watts, A. C., Ambrosia, V. G., e Hinkley, E. A. 2012. "Unmanned Aircraft Systems in Remote Sensing and Scientific Research: Classification and Considerations of Use." *Remote Sensing* 4 (6): 1671–92. <https://doi.org/10.3390/rs4061671>.
- Yang, C., Everitt, J. H., Du, Q., Luo, B., e Chanussot, J. 2013. "Using High-Resolution Airborne and Satellite Imagery to Assess Crop Growth and Yield Variability for Precision Agriculture." *Proceedings of the IEEE* 101 (3): 582–92. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2012.2196249>.
- Yao, R. J., Yang, J. S., Zhang, T. J., Gao, P., Wang, X. P., Hong, L. Z., e Wang, M. W. 2014. "Determination of Site-Specific Management Zones Using Soil Physico-Chemical Properties and Crop Yields in Coastal Reclaimed Farmland." *Geoderma* 232–234. Elsevier B.V.: 381–93. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.06.006>.
- Zhang, C., e Kovacs, J. M. 2012. "The Application of Small Unmanned Aerial Systems for Precision Agriculture: A Review." *Precision Agriculture* 13 (6): 693–712. <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>.

Zhao, R., Li, M., Sun, H., Zhang, Y., e Yang, W. 2012. "Application of Multi-Spectral Images and Remote Sensing in Precision Crop Management." American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2012, ASABE 2012 6 (12): 4849–57.