



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

LUCAS RONZONI CALVIERA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DE PROCESSAMENTO DE
IMAGENS TERMAIS DE DRONES DJI PARA APLICAÇÕES AMBIENTAIS**

Porto Alegre

2024

LUCAS RONZONI CALVIERA

**DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DE PROCESSAMENTO DE
IMAGENS TERMAIS DE DRONES DJI PARA APLICAÇÕES AMBIENTAIS**

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Ambiental.

Orientador: Dr. Fernando Mainardi Fan

Porto Alegre

2024

CIP - Catalogação na Publicação

Calviera, Lucas
DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DE PROCESSAMENTO
DE IMAGENS TERMAIS DE DRONES DJI PARA APLICAÇÕES
AMBIENTAIS / Lucas Calviera. -- 2024.
70 f.
Orientador: Fernando Mainardi Fan.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Drone termal. 2. DJI. 3. Processamento. 4.
Geoprocessamento. 5. Aplicações ambientais. I.
Mainardi Fan, Fernando, orient. II. Título.

LUCAS RONZONI CALVIERA

DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA DE PROCESSAMENTO DE
IMAGENS TERMAIS DE DRONES DJI PARA APLICAÇÕES AMBIENTAIS

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **15/02/2024** pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Prof. Dr. Alfonso Risso – Departamento de Obras Hidráulicas

.....
Msc. Leonardo Leipelt – Bolsista de Doutorado IPH - UFRGS

Conceito:

Dedico este trabalho aos meus pais, cujo apoio
incansável foi fundamental para que eu pudesse
alcançar este momento.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Luciane Ronzoni e Jean Louis Calviera, que nunca deixaram me faltar nada, e sempre me colocaram como prioridade apesar de tudo. Se cheguei até aqui é graças a todo o esforço que colocaram em mim, serei eternamente grato a vocês. Espero conseguir retribuir tudo que vocês já fizeram por mim.

A minha namorada, Gabriela Garay, que me acompanha desde 2014. Já vivemos tantas coisas um do lado do outro, fico muito feliz de estarmos realizando mais essa conquista juntos, ansioso para comemorar o teu TCC daqui uns anos. Muito obrigado por todo o carinho e companheirismo durante todos esses anos.

Aos meus colegas de trabalho, especialmente aos supervisores Laís Gaeversen, Larissa Soares e Lucas Kehl, que me auxiliaram durante os dois anos de estágio, ajudando a me desenvolver tanto como pessoa quanto como profissional.

A todos amigos que pela minha vida e contribuíram para eu conseguir chegar até aqui. Em especial ao meu irmão de sangue Felipe Calviera, e meus irmãos de vida, Matheus Schulz e Gabriel Dal Pozzo.

Por fim, ao meu professor orientador Fernando Fan, que sempre me ajudou ao longo da graduação, seja nas cadeiras, empresa júnior, bolsa ou TCC. Pode ter certeza de que tu és um exemplo de pessoa e profissional para mim e para muita gente.

RESUMO

CALVIERA, L. Desenvolvimento de uma Ferramenta de Processamento de Imagens Termiais de Drones DJI para Aplicações Ambientais. 2024. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

Este trabalho propõe o desenvolvimento de uma aplicação de código aberto em linguagem de programação Python para o processamento de imagens adquiridas por drones térmicos da DJI, utilizando como base as capturas realizadas pelo Drone DJI Mavic 3 Enterprise Thermal (M3T). A pesquisa abrange desde a extração dos metadados dos arquivos R-JPEG até a criação de mosaicos georreferenciados, incorporando os valores de temperatura para cada pixel da imagem. Ao longo do desenvolvimento, a aplicação foi dividida em etapas, facilitando a execução sequencial e permitindo ajustes e melhorias no futuro, visando contribuir para o avanço contínuo do projeto. No âmbito da Engenharia Ambiental, esta iniciativa visa ampliar as possibilidades de utilização de drones termiais na área, simplificando a obtenção de informações de temperatura da superfície, compatíveis com os softwares de geoprocessamento tradicionais.

Palavras-chave: drones termiais; mosaico; processamento, DJI.

ABSTRACT

This thesis proposes the development of an open source application in Python programming language for the processing of images acquired by DJI thermal drones, based on the images captured by the DJI Mavic 3 Enterprise Thermal Drone (M3T). The research ranges from removing metadata from R-JPEG files to creating georeferenced mosaics that include temperature values for each pixel of the image. Throughout the development, the project has been divided into stages to facilitate sequential execution and to allow for future applications and enhancements. In the context of environmental engineering, this initiative aims to expand the possibilities of using thermal drones in the field, simplifying the acquisition of surface temperature information, compatible with traditional geoprocessing software.

Keywords: thermal drones; mosaic; processing, DJI.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Drone DJI Mavic 2 Enterprise.	23
Figura 2 – Espectro eletromagnético.....	24
Figura 3 – Exemplo de visualização de arquivo JPG realizado com drone termal DJI.....	33
Figura 4 – Planos disponíveis do FLIR Thermal Studio.	35
Figura 5 – Fluxograma metodológico para obtenção do mosaico a partir das imagens R-JPEG.....	37
Figura 6 – Metadados do arquivo R-JPEG.....	39
Figura 7 – Interpretação dos dados binários.	40
Figura 8 – Código para obter dados de temperatura através do DJI Thermal SDK.	42
Figura 9 – Código para conversão dos arquivos RAW em TIFF 45	45
Figura 10 – Código para copiar os metadados dos arquivos R-JPEG para os arquivos TIFF 46	46
Figura 11 – Identificação da temperatura do pixel no arquivo TIFF. 47	47
Figura 12 –Relação entre o campo de visão da câmera e a altura do drone com o tamanho da imagem..... 48	48
Figura 13 –Orientação longitudinal da câmera para cálculo do tamanho do pixel 49	49
Figura 14 –Resultado do georreferenciamento sem rotação..... 51	51
Figura 15 – Função para rotacionar cada arquivo GeoTIFF..... 52	52
Figura 16 –Resultado do georreferenciamento após a rotação..... 53	53
Figura 17 – Código para geração do mosaico..... 54	54
Figura 18 – Comparativo entre os valores obtidos no DJI Analysis Tools 3Tools e no arquivo TIFF gerado..... 56	56
Figura 19 – Resultado do georreferenciamento do arquivo GeoTIFF gerado. . 58	58

Figura 20 – Comparação entre a escolha de diferentes valores de temperatura máxima na geração da paleta de cores dos mosaicos..... 60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Especificações de drones termais.	27
Tabela 2 – Tempo de processamento por etapa	61

LISTA DE SIGLAS

ARARA: Aeronave de Reconhecimento Assistida por Rádio e Autônoma

AURORA: Autonomous Unmanned Remote Monitoring Robotic Airship

BDG: Bancos de Dados Geográficos

CBT: Companhia Brasileira de Tratores

CENPRA: Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer

CIMMYT: International Maize and Wheat Improvement Center

CITSEM: Centro de Pesquisa em Tecnologias de Software e Sistemas Multimídia para a Sustentabilidade

CTA: Centro Tecnológico Aeroespacial

EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

FOV: Field of View

GDAL: Geospatial Data Abstraction Library

GNSS: Global Navigation Satellite System

ICMBio: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade

IPH: Instituto de Pesquisas Hidráulicas

IR: Radiação Infravermelha

ISPRS: Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto

M3T: DJI Mavic 3 Enterprise Thermal

NETD: Diferença de Temperatura Equivalente ao Ruído

PIL: Python Imaging Library

PSF: Python Software Foundation

R-JPEG: Radiométricas-JPEG

SIG: Sistemas de Informações Geográficas

TIFF: Tagged Image File Format

TIR: Infravermelho Térmico

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UPM: Universidade Politécnica de Madri

VANT: Veículo Aéreo Não Tripulado

WWF: World Wildlife Fund

SUMÁRIO

.....	1
1. INTRODUÇÃO.....	16
2. OBJETIVOS.....	17
2.1. Objetivo Geral.....	17
2.2. Objetivos Específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
3.1. Drones.....	18
3.1.1. Histórico.....	18
3.1.1. Aplicações ambientais utilizando drones	19
3.2. Drone Termal.....	23
3.2.1. Modelos disponíveis	25
3.2.1. Aplicações dos drones termais na Engenharia Ambiental... 28	
3.3. Softwares disponíveis.....	32
4. METODOLOGIA	36
4.1. Extração dos dados térmicos dos arquivos R-JPG	38
4.1.1. Estrutura geral dos metadados.....	38
4.1.2. Metadados do drone DJI M3T	39
4.1.3. Processamento para obtenção da temperatura.....	41
4.2. Conversão dos dados de temperatura para arquivos TIFF	42
4.2.1. Formato TIFF.....	43
4.2.2. Biblioteca GDAL	43
4.2.3. Processamento para conversão de arquivos RAW para TIFF	
44	
4.2.4. Transferência dos metadados	45
4.3. Conversão para GeoTIFF.....	46
4.3.1. Georreferenciamento.....	47

4.3.2.	Cálculo do tamanho do pixel	48
4.3.3.	Processamento para conversão dos arquivos Tiff para GeoTIFF	49
4.3.4.	Rotação da imagem.....	52
4.4.	Mosaico	53
5.	RESULTADOS.....	55
5.1.	Resultados do processamento	55
5.2.	Tempo de processamento	60
6.	DISPONIBILIDADE E APLICAÇÃO DO SOFTWARE	62
7.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	64
8.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	66

1. INTRODUÇÃO

A utilização de drones na engenharia tem se tornado uma prática cada vez mais importante e difundida. Este avanço é impulsionado pelo constante progresso tecnológico, que tem aprimorado significativamente as capacidades desses equipamentos. No contexto da engenharia ambiental, o emprego dos drones também é uma prática comum, abrangendo diversas aplicações, como monitoramento de áreas de risco e levantamentos topográficos.

Nos últimos anos, em virtude do aprimoramento na qualidade dos sensores térmicos, facilitando a aquisição de dados na faixa espectral do infravermelho térmico (TIR), esses sensores passaram a ser incorporados em drones. Essa integração ampliou ainda mais as possibilidades de aplicação, principalmente na área ambiental, com o monitoramento da temperatura de corpos hídricos e a identificação de alterações ambientais.

Contudo, apesar das diversas possibilidades de aplicação dos drones termais, existe atualmente um fator limitante para o processamento das imagens geradas por eles: o difícil acesso a *softwares* de acesso livre. A recente disponibilização desses drones faz com que não existam ferramentas acessíveis para extrair os dados térmicos das imagens geradas e processá-los para geração de arquivos compatíveis com *softwares* de geoprocessamento tradicionais.

É nesse contexto que este projeto se insere, buscando preencher a lacuna identificada entre a crescente utilização de drones termais e a demanda por ferramentas para processar os dados gerados por eles. Ao propor um programa de código aberto dedicado ao processamento das imagens térmicas de drones, o objetivo do trabalho é não apenas suprir uma demanda emergente, mas também contribuir para o avanço contínuo da tecnologia, não apenas na engenharia ambiental, mas também para todas as áreas do conhecimento.

Ao aprimorar a disponibilização de informações térmicas e fornecer uma ferramenta acessível e eficaz, espera-se que este projeto abra novas possibilidades para a interpretação e análise de dados ambientais, promovendo uma gestão mais informada e sustentável.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

O presente estudo visa desenvolver e aplicar uma ferramenta para processamento de imagens provenientes de drones com sensores termais da DJI, visando futuras aplicações ambientais.

2.2. Objetivos Específicos

- a) Abordar o contexto da aplicação de drones termais em aplicações ambientais;
- b) Criar uma ferramenta para a extração de dados de temperatura de drones termais e sua conversão para um formato compatível com *softwares* de geoprocessamento convencionais;
- c) Georreferenciar as imagens convertidas, incluindo os valores de temperatura associados;
- d) Possibilitar a criação de um mosaico composto pelas imagens georreferenciadas;
- e) Fomentar a utilização de drones termais para aplicações ambientais, disponibilizando o acesso a uma ferramenta gratuita para processamento das imagens termais da DJI.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica abrange, inicialmente, o histórico e as aplicações dos drones na Engenharia Ambiental. Posteriormente, entra-se no contexto específico dos drones termais, apresentando seu funcionamento, modelos disponíveis e aplicações. Por último, são abordados os *softwares* atuais disponíveis para o processamento das imagens geradas pelos drones termais e suas limitações.

3.1. Drones

Drones são aeronaves capazes de voar sem a presença de pilotos ou passageiros a bordo. O controle dos drones é realizado remotamente por ondas de rádio ou de forma autônoma, seguindo uma rota predeterminada. Drones não possuem um tamanho específico ou tipo de propulsão e, frequentemente, são equipados com acessórios para vigilância e monitoramento (KARDASZ, *et al.*, 2016). Os próximos subcapítulos contextualizam o histórico sobre os drones e trazem exemplos de aplicações dos drones para conservação ambiental, aterros sanitários e cartografia.

3.1.1. Histórico

De acordo com Jorge (2014), um drone é um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) que possui controle de voo e pode receber comandos por meio de radiofrequência, infravermelho e até mesmo missões definidas previamente por coordenadas *Global Navigation Satellite System* (GNSS). A concepção inicial dos drones remonta a propósitos militares, sendo inspirados nas bombas voadoras alemãs e nos aeromodelos rádio controlados, conforme discutido por Marinho (2019).

A concretização efetiva do uso militar de VANTs ocorreu durante a Segunda Guerra Mundial, como indicado por Prudkin (2019). Apesar de terem sido inicialmente desenvolvidos para fins bélicos, os VANTs foram adaptados ao longo do tempo para aplicações civis. Nesse sentido, destaca-se a “Global Hawk”

como a primeira missão científica utilizando um VANT a atravessar o Oceano Pacífico (Longhitano, 2010).

No cenário brasileiro, os primeiros relatos de VANTs datam da década de 80, com o projeto Acauã apresentado pelo Centro Tecnológico Aeroespacial (CTA) para fins militares. Este projeto foi posteriormente reativado em 2007 por uma iniciativa governamental (De Souza, 2020). Marinho (2019) destaca o primeiro drone brasileiro registrado, o BQM1BR, um protótipo de VANT propulsionado a jato, que voou pela primeira vez em 1983, fabricado pela Companhia Brasileira de Tratores (CBT) com uma Turbina Tiête TJ-2, fabricada pelo CTA. Este protótipo foi concebido para servir como alvo aéreo.

Outros desenvolvimentos notáveis no contexto nacional incluem o projeto AURORA (*Autonomous Unmanned Remote Monitoring Robotic Airship*), desenvolvido pelo Centro de Tecnologia da Informação Renato Archer (CENPRA) em 2007 (Medeiros, 2007). Além disso, iniciativas específicas para aplicações civis, como o Projeto ARARA (Aeronave de Reconhecimento Assistida por Rádio e Autônoma), focado na agricultura, também ganharam destaque (Jorge, 2014).

A EMBRAPA Instrumentação, pioneira no emprego de veículos aéreos não tripulados no Brasil, iniciou suas pesquisas em 1998. Inicialmente, a proposta era substituir aeronaves convencionais utilizadas para fotografias aéreas e monitoramento agrícola por VANTs de pequeno porte (Chiarello, 2017).

A partir da análise do histórico dos drones, é possível observar que a evolução tecnológica possibilitou a ampliação das aplicações dos drones em diferentes áreas. Nesse sentido, o próximo subcapítulo é focado nas aplicações que essas evoluções permitiram no âmbito ambiental.

3.1.1. Aplicações ambientais utilizando drones

A área da Engenharia Ambiental engloba diversos temas e áreas do conhecimento, o que faz com que os drones de modo geral encontrem muito espaço de contribuição e desenvolvimento nos mais determinados assuntos possíveis. Nesse contexto, serão destacadas três áreas em que os drones são amplamente utilizados no âmbito da engenharia ambiental.

3.1.1.1. *Conservação ambiental*

A crescente ênfase na utilização de drones para ações de conservação ambiental tem impulsionado significativos investimentos no desenvolvimento de novos modelos e na melhoria contínua da tecnologia (Lima, *et al.*, 2017). Os VANTs destacam-se pelo seu vasto potencial em iniciativas de proteção ambiental, desempenhando funções diversas que incluem o mapeamento em alta resolução de áreas sobrevoadas, monitoramento da fauna e flora, bem como a atuação no combate a incêndios.

Barbosa (2016) destaca, com base em pesquisas realizadas na Universidade Monash, Canadá, que os drones apresentam eficiência superior em estudos ecológicos quando comparados aos métodos tradicionais de patrulha por terra. A capacidade desses equipamentos em monitorar áreas fora do alcance humano permite a identificação de habitats animais, áreas de preservação e a transmissão de informações em tempo real.

O Centro de Pesquisa em Tecnologias de Software e Sistemas Multimídia para a Sustentabilidade (CITSEM) da Universidade Politécnica de Madri (UPM), conforme relato da EFE (2016), desenvolveu um sistema avançado para antecipar e combater ameaças ambientais, como incêndios florestais, desmatamento e inundações. Esse sistema, integrado a drones, utiliza o reconhecimento de cores para detectar eventos adversos, possibilitando a vigilância eficaz e substituindo sistemas de vigilância fixos, comprovando sua utilidade, eficácia, versatilidade e baixo custo.

Sodré (2016) compartilha um exemplo prático no município de Niterói, Rio de Janeiro, onde a Secretaria Municipal de Meio Ambiente, Recursos Hídricos e Sustentabilidade, em parceria com a defesa civil, emprega drones para combater focos de incêndio. Durante um sobrevoo, identificou-se um pequeno foco próximo a uma residência, permitindo uma resposta rápida e preventiva do corpo de bombeiros.

No cenário brasileiro, instituições como o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) e a *World Wildlife Fund* (WWF) Brasil utilizam drones no projeto Ecodrones para monitorar atividades ilegais, como

desmatamento e queimadas, nas matas da Amazônia e do Cerrado (Carvalho, 2015). O Nauru 500 foi o primeiro modelo empregado nesse contexto.

Ainda nesse contexto, um drone foi criado para observar ações ilegais de madeiras e mineração na região da Floresta Amazônica (CABALLERO *et al.*, 2018). Esses exemplos evidenciam a diversidade de aplicações dos drones na preservação ambiental, destacando seu papel crucial na coleta de dados e monitoramento de áreas de difícil acesso, principalmente.

3.1.1.2. Aterros Sanitários

O emprego de drones no diagnóstico ambiental de áreas potencialmente insalubres, como os aterros sanitários, representa uma abordagem inovadora que minimiza os riscos à saúde ocupacional ao permitir o acesso remoto a locais de estudo. Da Silva (2021) conduziu uma pesquisa com o objetivo de estimar o volume de resíduos sólidos visíveis dispostos de maneira inadequada no aterro sanitário no município de Pontal do Paraná, situado no litoral do Estado do Paraná, fazendo uso de um drone.

Os resultados desse estudo demonstraram a viabilidade de gerar uma projeção planimétrica altamente precisa do terreno, utilizando imagens ortogeoreferenciadas, que se mostraram valiosas em estudos topográficos. Além disso, o drone revelou-se uma ferramenta eficaz para o monitoramento operacional de aterros sanitários, possibilitando a determinação de cotas de taludes, estimativa do volume da jazida de solo para recobrimento de resíduos e avaliação da estabilidade do aterro. Essas análises, baseadas em mosaicos de ortofotos produzidos durante os sobrevoos, contribuem para evitar desmoronamentos.

Um estudo correlato foi conduzido por Mello *et al.* (2017), abordando o levantamento das condições operacionais de um aterro sanitário industrial. O propósito dessa pesquisa era mapear o terreno e identificar potenciais questões geotécnicas, bem como problemas relacionados ao escoamento de chorume e ao nivelamento dos resíduos no maciço. Essa abordagem complementar evidencia a aplicabilidade generalizada do uso de drones para a análise

detalhada e eficiente de aterros sanitários, contribuindo para a identificação precoce de desafios operacionais e ambientais.

3.1.1.3. Cartografia

A integração dos VANTs na cartografia representa um avanço significativo, introduzindo novas perspectivas para o mapeamento baseado em imagens digitais. Neste contexto, a consideração crítica recai sobre as habilidades do engenheiro em analisar, coletar, processar e representar informações de maneira a satisfazer as demandas dos usuários (FAGUNDES e IESCHECK, 2019).

A fotogrametria, conforme definida pela Sociedade Internacional de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ISPRS), é a ciência que consiste na arte e tecnologia de obter informações confiáveis da superfície da terra e demais objetos físicos, através de medições, análises e representações utilizando fotografias (ISPRS, 2016). Ela emerge como o princípio teórico essencial no mapeamento com drones, no qual a aplicação dessa abordagem proporciona a obtenção de dados de alta precisão, contribuindo para a qualidade aprimorada dos produtos cartográficos.

O emprego integrado de métodos fotogramétricos com avanços em visão computacional, enfatizado por Silva (2015), tem catalisado a crescente demanda por imagens digitais adquiridas por plataformas não tripuladas. Segundo o mesmo autor, a utilização de drones para mapeamento também é impulsionada pela evolução dos receptores GNSS nas aeronaves, conferindo maior precisão nos voos, além de controle aprimorado de estabilidade e altitude.

Como ilustração prática, um projeto foi executado no município de Candiota, no estado do Rio Grande do Sul, com o propósito de realizar o mapeamento tridimensional do complexo termelétrico de Candiota e da área adjacente, utilizando VANTs. Os resultados obtidos foram considerados satisfatórios, evidenciando que a qualidade posicional planimétrica do mapa gerado estava alinhada com os requisitos para a elaboração de produtos cartográficos em escalas 1:500 ou inferiores, de acordo com o padrão de exatidão cartográfica classe A (FAGUNDES e IESCHECK, 2019).

3.2. Drone Termal

Os drones termais ou drones térmicos representam uma evolução significativa em relação aos drones convencionais, trazendo consigo a capacidade de capturar informações térmicas da superfície terrestre. Enquanto os drones tradicionais são amplamente conhecidos por suas capacidades de captura visual e mapeamento, os drones térmicos acrescentam uma camada adicional de funcionalidade ao possibilitar a detecção de variações de temperatura no ambiente.

Na maioria dos casos, os drones equipados com sensores térmicos possuem duas câmeras distintas: uma câmera visual e outra câmera térmica. Esta configuração é evidenciada pelas indicações A e B na Figura 1, que fornece uma abordagem integrada, permitindo a comparação entre as imagens das duas câmeras.

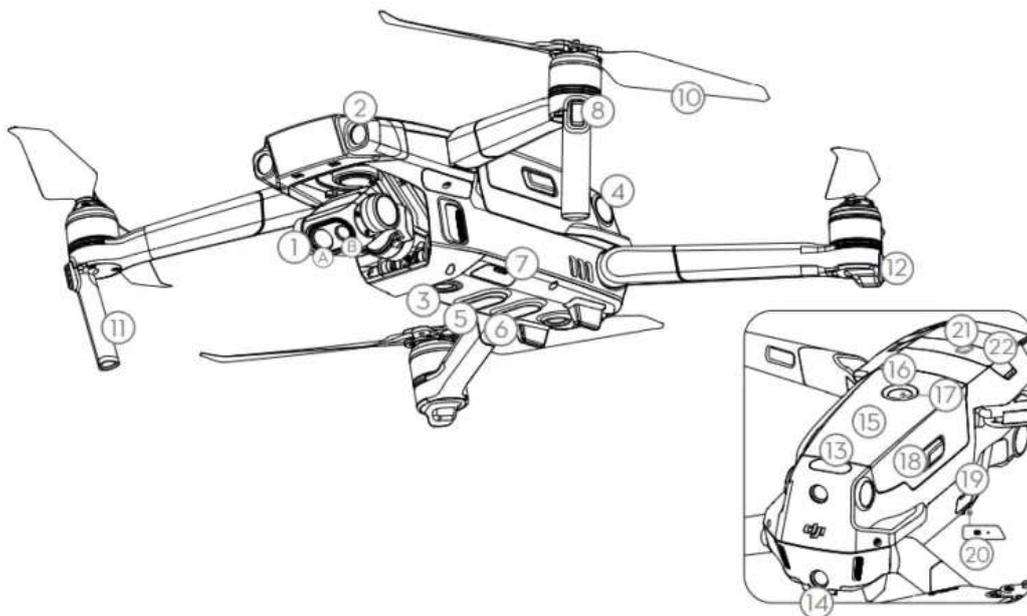


Figura 1 - Drone DJI Mavic 2 Enterprise.
Fonte: DJI, 2021.

As câmeras térmicas, também conhecidas como câmeras infravermelhas, produzem imagens com base na radiação infravermelha (IR) emitida por objetos. Elas detectam comprimentos de onda no espectro infravermelho, tipicamente de 750 a 1350 nanômetros (nm), enquanto as câmeras comuns captam a luz visível na faixa de 400 a 700 nm (Figura 2). Portanto, as câmeras térmicas não detectam diretamente a temperatura, mas sim se baseiam no princípio de que todo objeto

emite radiação infravermelha. Essas câmeras conseguem captar radiação na parte do espectro IR que não é visível ao olho humano (OPGAL, 2018).

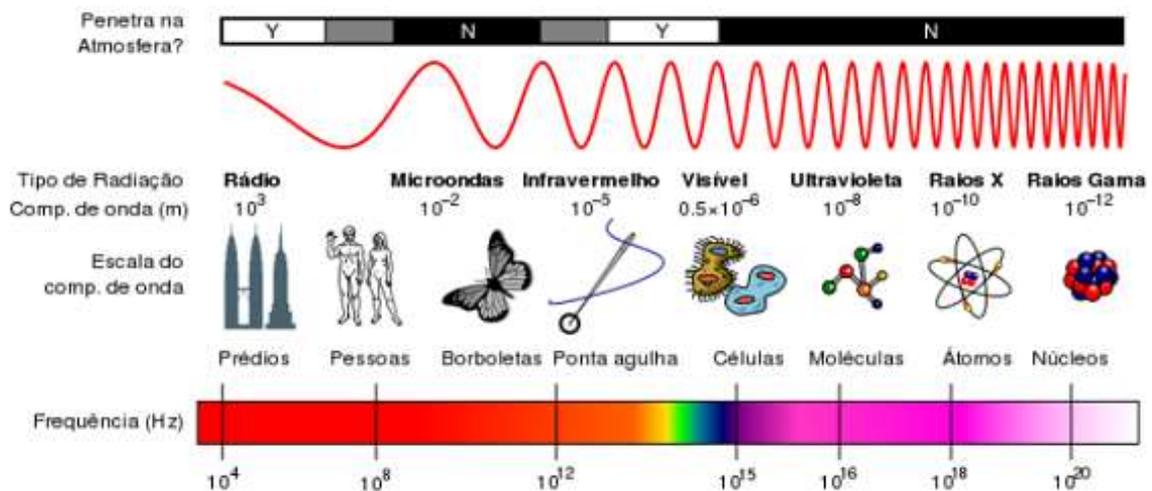


Figura 2 – Espectro eletromagnético.
Fonte: Villate, 2013.

Contudo, a conversão da radiação infravermelha para temperatura pode apresentar complexidades. Em muitos casos, é necessário estimar a emissividade de um objeto, pois ela influencia o comprimento de onda emitido pela radiação infravermelha. A emissividade é uma propriedade radiativa da superfície, expressa como a razão entre a energia emitida por uma superfície e a de uma superfície ideal de corpo negro. A escala de emissividade varia de 0 a 1, representando um espelho perfeito e um corpo negro ideal, respectivamente (SIFNAIOS *et al.*, 2021).

A presença de água na superfície também pode afetar a temperatura do objeto devido à evaporação, diminuindo a temperatura do objeto. Assim, para obter uma temperatura de superfície precisa, as imagens devem ser capturadas preferencialmente em superfícies secas, e a emissividade correta deve ser utilizada, sendo possível ajustá-la nas configurações da maioria dos drones termais (SIFNAIOS *et al.*, 2021).

3.2.1. Modelos disponíveis

O emprego de drones térmicos está em ascensão no Brasil, conquistando crescente relevância em diversas esferas de atuação. Seu alcance abrange desde auxílio em operações de resgate, onde bombeiros podem identificar indivíduos, até a esfera agrícola, contribuindo na detecção de déficits hídricos nas plantações. Na escolha e avaliação de drones térmicos, é essencial ponderar os aspectos mais pertinentes à aplicação específica, atentando para as especificações técnicas de cada dispositivo.

O primeiro aspecto que costuma ser abordado pelos fornecedores de drones térmicos é a resolução espacial infravermelha (IR), que diz respeito à quantidade de pixels utilizados na formação da imagem. Quanto maior a resolução, mais detalhes podem ser discernidos, uma vez que uma quantidade maior de pixels é empregada nesse processo.

No que diz respeito às condições ambientais em que o drone operará, é possível encontrar drones que apresentam resistência à água, com classificações de grau de proteção, como o IP43, indicando proteção contra água aspergida. Além disso, é importante ter conhecimento sobre a resistência máxima ao vento para assegurar o correto funcionamento do dispositivo.

Além disso, no que concerne às condições operacionais do drone, destaca-se o tempo de voo máximo, sendo essencial em aplicações que o drone permaneça no ar por períodos mais prolongados. O entendimento da distância máxima de transmissão e da velocidade máxima alcançada pelo drone também é crucial para o tipo específico de aplicação desejado.

Agora, mais especificamente nos detalhes da câmera térmica, a faixa espectral, que indica os comprimentos de onda detectados pelo sensor da câmera, é selecionada com base na aplicação específica, seja para detecção de vazamentos de gás ou para usos mais abrangentes. A sensibilidade térmica, também conhecida como Diferença de Temperatura Equivalente ao Ruído (NETD), quantifica a habilidade da câmera em identificar variações mínimas de temperatura, sendo fundamental para determinar a precisão, especialmente em situações que demandam detecção térmica sensível.

Essas são apenas algumas das especificações cruciais na seleção do drone, o que ressalta a importância de compreender o objetivo pretendido com o drone térmico para a aquisição do drone que satisfaça essa necessidade. Frequentemente, a decisão é influenciada pelo preço, negligenciando aspectos fundamentais para uma determinada aplicação. Uma análise detalhada dessas especificações proporciona uma base técnica sólida para a escolha apropriada de uma câmera térmica para drones. A Tabela 1 destaca alguns aspectos relevantes discutidos, comparando as especificações de drones de diversos fabricantes.

	DJI Mavic 3T	Autel 640T V3	Teledyne FLIR SIRAS	DJI Mavic 2 Enterprise Dual Edition	Autel EVO MAX 4T	Parrot ANAF USA
Tempo de voo máximo (min)	45	40	31	31	42	32
Distância máxima de transmissão (Km)	15,0	15,0	9,7	13,0	20,0	5,0
Velocidade máxima (Km/h)	75,6	71,9	64,4	72,0	82,7	54,1
Resistência máxima ao vento (m/s)	11,9	17,4	9,8	10,5	12,1	15,0
Classificação à prova d'água	Sem classificação	Sem classificação	IP54	Sem classificação	IP43	IP53
Resolução infravermelha	640x512 (30fps)	640x512 (30fps)	640x512 (60fps)	640x512 (30fps)	640x512 (30fps)	320x256
Preço (jan/2024)	R\$ 26.990,00	R\$ 22.880,00	Indisponível no Brasil	R\$ 26.000,00	R\$ 46.000,00	R\$ 18.990,00

Tabela 1 - Especificações de drones termais.

Fonte: Elaboração própria.

3.2.1. Aplicações dos drones termais na Engenharia Ambiental

A utilização de drones termais abrange diversos setores, desde a engenharia civil, onde são empregados para identificar infiltrações e rachaduras em estruturas de concreto, até o combate a incêndios, nos quais as chamas podem não ser visíveis. No entanto, mesmo com a engenharia ambiental englobando uma ampla variedade de campos, a implementação de drones térmicos nessa área ainda não é amplamente difundida, apesar do seu considerável potencial.

Se as aplicações dentro da engenharia ambiental como um todo já são insipientes atualmente, no contexto brasileiro esse cenário é ainda mais deficitário. Nos subcapítulos subsequentes, serão exploradas três áreas em que os drones têm se mostrado valiosos para desenvolver soluções relacionadas aos desafios enfrentados pela engenharia ambiental.

3.2.1.1. Irrigação

A água, um recurso natural precioso e limitado, detém valor econômico e é essencial para a existência de todos os seres vivos. Seu uso apresenta características específicas relacionadas à quantidade e qualidade da aplicação, influenciando e sendo influenciado pelas condições das águas superficiais e subterrâneas. Os usos podem ser categorizados como consuntivos (implicam consumo direto de água) e não consuntivos (não envolvem consumo direto, mas dependem da preservação das condições naturais ou da operação da infraestrutura hídrica) (ANA, 2021).

A Resolução CNRH nº 232/2022, de 22/03/2022, que aprova o Plano Nacional de Recursos Hídricos 2022-2040, classifica como usos consuntivos da água o abastecimento humano, o abastecimento animal, a indústria, a mineração, a irrigação e a termoeletricidade. Por outro lado, usos como navegação, pesca, recreação, turismo e lazer não retiram água diretamente, ou seja, são não consuntivos.

A agricultura irrigada é o maior usuário de água no Brasil e no mundo, empregando práticas agrícolas que visam suprir a deficiência total ou parcial de

água para as plantas. Cada cultura demanda uma quantidade específica de água, variando de acordo com as fases do desenvolvimento e as condições climáticas locais. Parâmetros como esses, combinados com a eficiência do método ou sistema de irrigação, são fundamentais para calcular a quantidade de água necessária a ser captada de mananciais superficiais ou subterrâneos (ANA, 2021).

Apesar da abundância de recursos hídricos no Brasil, seu uso em diversas atividades, como agricultura, geração de energia hidrelétrica, navegação e lazer, pode gerar conflitos. A agricultura, como principal consumidora de água no país, desempenha um papel significativo nesses conflitos, devido à sua alta demanda hídrica. Nesse contexto, diversos estudos têm destacado a relevância da utilização de drones térmicos no planejamento da irrigação, a fim de aprimorar o uso da água para este fim (VIANA *et al.*, 2018).

GHAZOUANI *et al.* (2017) conduziram uma avaliação do potencial do uso combinado de imagens térmicas e modelos de simulação para examinar os efeitos do estresse hídrico e salino na cultura da batata, nas condições ambientais da Tunísia central. Suas conclusões apontaram que as imagens termográficas infravermelhas processadas podem ser consideradas uma poderosa ferramenta para o planejamento da irrigação na cultura da batata, desempenhando um papel crucial no uso eficiente da água.

Por outro lado, ROMANO *et al.* (2011) conduziram experimentos para explorar o uso de imagens termográficas na fenotipagem de milho em unidades experimentais no International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT) em Tlaltizapán, México. Ao avaliarem um grupo de plantas irrigadas em comparação com outro submetido ao estresse, concluíram que as imagens térmicas podem ser aplicadas para rastrear variedades de milho tolerantes ao estresse hídrico, possibilitando a criação de uma nova plataforma de fenotipagem para acelerar o processo de seleção em programas de melhoramento genético.

Estudos como estes revelam o potencial significativo das imagens térmicas, especialmente quando combinadas com modelos de simulação, para avaliar e mitigar os efeitos do estresse hídrico em culturas agrícolas específicas, como batata e milho.

No cenário brasileiro, onde a água é um recurso precioso e disputado, especialmente devido à sua utilização intensiva na agricultura, as informações provenientes de estudos como esses podem contribuir de maneira valiosa para o aprimoramento da gestão hídrica e o desenvolvimento de práticas agrícolas mais sustentáveis. Dessa forma, a integração da tecnologia de drones térmicos nas estratégias de planejamento da irrigação, como sugerido por VIANA et al. (2018), emerge como uma ferramenta promissora para otimizar o uso da água na agricultura, promovendo a eficiência e a sustentabilidade.

3.2.1.2. *Hidrologia e mudanças climáticas*

As mudanças climáticas têm implicações diretas na temperatura dos corpos d'água, influenciando a biodiversidade e a saúde dos ecossistemas aquáticos. Os drones térmicos, com sua capacidade de capturar dados em alta resolução, representam uma oportunidade promissora para monitorar e compreender os impactos dessas mudanças. Dugdale *et al.* (2019), discute a eficácia desses drones na identificação de entradas térmicas específicas nos rios, fornecendo uma visão detalhada crucial para a gestão e preservação dos recursos hídricos.

Os resultados do estudo revelam que os dados térmicos obtidos por drones são capazes de identificar com clareza a localização e a extensão de entradas térmicas discretas nos rios. No entanto, a imagem térmica é suscetível a um viés induzido pelo desvio de temperatura, prejudicando a extração precisa dos dados de temperatura. A análise estatística das causas desse desvio revela que as características do voo do drone e as condições ambientais no momento da aquisição explicam aproximadamente 66% da variação no desvio do sensor TIR.

Outra consequência direta das mudanças climáticas, associada ao uso da terra, é observada nas nascentes, resultando em impactos significativos nos ecossistemas a jusante e nas comunidades dependentes deles. Apesar de décadas de pesquisa hidrológica, as limitações na observação das propriedades hidrológicas em diversas escalas restringem o conhecimento científico sobre os processos que influenciam o fluxo dos rios nas nascentes.

Contudo, o surgimento recente de duas tecnologias complementares, drones e sensoriamento remoto por TIR, tem o potencial de coletar dados em escalas e resoluções necessárias para avançar na compreensão dos processos hidrológicos nas nascentes. Dugdale *et al.*, 2022 defendem a ideia de que o TIR baseado em drones pode oferecer observações únicas de alta resolução sobre a conectividade da superfície e a dinâmica dos trechos de nascentes em várias escalas espaço-temporais.

Neste estudo, explora-se o estado atual das tecnologias de drones e imagens TIR nas ciências hidrológicas, destacando os benefícios potenciais, mas também os passos que precisarão ser dados para liberar todo o potencial dessas tecnologias. Conclui-se afirmando que o TIR baseado em drones está particularmente bem-posicionado para preencher a lacuna atual entre observações de campo (pontuais) e simulações de modelos, proporcionando a compreensão hidrológica aprimorada necessária para um mundo em transformação.

3.2.1.3. Monitoramento da qualidade da água

O monitoramento ágil da qualidade da água em corpos receptores é vital para a preservação e proteção dos recursos hídricos e terrestres associados. Este monitoramento tradicionalmente envolve a obtenção de amostras *in situ* da coluna d'água. As amostras são analisadas em tempo real pelo instrumento de amostragem ou são preservadas para análises subsequentes em laboratório. As limitações temporais, espaciais e financeiras inerentes a esse método incentivam o desenvolvimento de tecnologias de monitoramento por sensoriamento remoto e sensores *in situ* (AHN *et al.*, 2006).

Em sistemas naturais, fenômenos de poluição da qualidade da água podem ocorrer em diversas escalas espaciais e envolver uma variedade de poluentes químicos, tornando desafiador e dispendioso monitorá-los rapidamente com amostragem *in situ* e uma abordagem de sensoriamento remoto de escala espacial ou temporal fixa. Idealmente, o monitoramento da qualidade da água em áreas-alvo de poluição deve ser flexível espacial e temporalmente, facilitando o processo de investigação ambiental na

caracterização do trajeto do poluente entre a fonte e o destino (HOOK, *et al*, 2004).

FERRARA (2017) demonstrou que a utilização hierárquica de imagens obtidas remotamente por satélites, seguida por imagens obtidas por helicóptero e, posteriormente, imagens próximas adquiridas por drones, oferece uma ampla cobertura espacial e temporal para apoiar o monitoramento da qualidade da água em cenários complexos de poluição. O estudo estabeleceu que câmeras térmicas de infravermelho podem ser utilizadas no monitoramento de anomalias na qualidade da água, com a temperatura radiométrica correlacionando fortemente com parâmetros de qualidade da água, como salinidade, clorofila-a, oxigênio dissolvido e turbidez.

Para isso, imagens obtidas remotamente pelo Landsat-8 foram usadas como primeira etapa para identificar plumas que estavam sendo descarregadas na água costeira. O helicóptero foi utilizado como segunda etapa para obter imagens próximas com uma resolução espacial de aproximadamente 10 cm, capazes de amostrar as plumas provenientes de canais de 3 a 300 metros. A área de interesse foi então levantada com imagens térmicas de drone, que capturou valores de temperatura que apresentaram correlação de 0,81 com a salinidade, 0,74 com a clorofila-a, 0,98 com o oxigênio dissolvido e -0,61 com a turbidez.

Embora neste estudo a utilização dos drones termais tenha sido apenas como uma das etapas do monitoramento, ele demonstra a utilidade do uso de imagens térmicas levantadas por drones no monitoramento de parâmetros de qualidade de água.

3.3. Softwares disponíveis

No que diz respeito aos *softwares* disponíveis para o processamento de imagens de drones termais, é imprescindível abordar aqueles desenvolvidos pela DJI, uma das principais fabricantes. A empresa oferece o DJI Analysis Tools, atualizado constantemente e atualmente em sua terceira versão. Conforme descrito em seu manual, o *software* destina-se à análise e processamento de imagens térmicas. Ao identificar as informações de

temperatura em áreas críticas do alvo, o programa pode ser aplicado para analisar objetos em diversas aplicações industriais, contribuindo para a prevenção ou tratamento imediato de incidentes significativos ao detectar e localizar anomalias de temperatura em equipamentos durante inspeções de rotina (DJI, 2023).

Por meio desse *software*, é possível carregar imagens no formato JPEG obtidas após o levantamento realizado com um drone e visualizar a temperatura da imagem, observando as variações térmicas. Adicionalmente, o programa permite traçar linhas, delimitar áreas e escolher pontos para identificações pontuais de temperatura. A Figura 3 ilustra um exemplo de visualização de imagem térmica utilizando o DJI Analysis Tools 3.

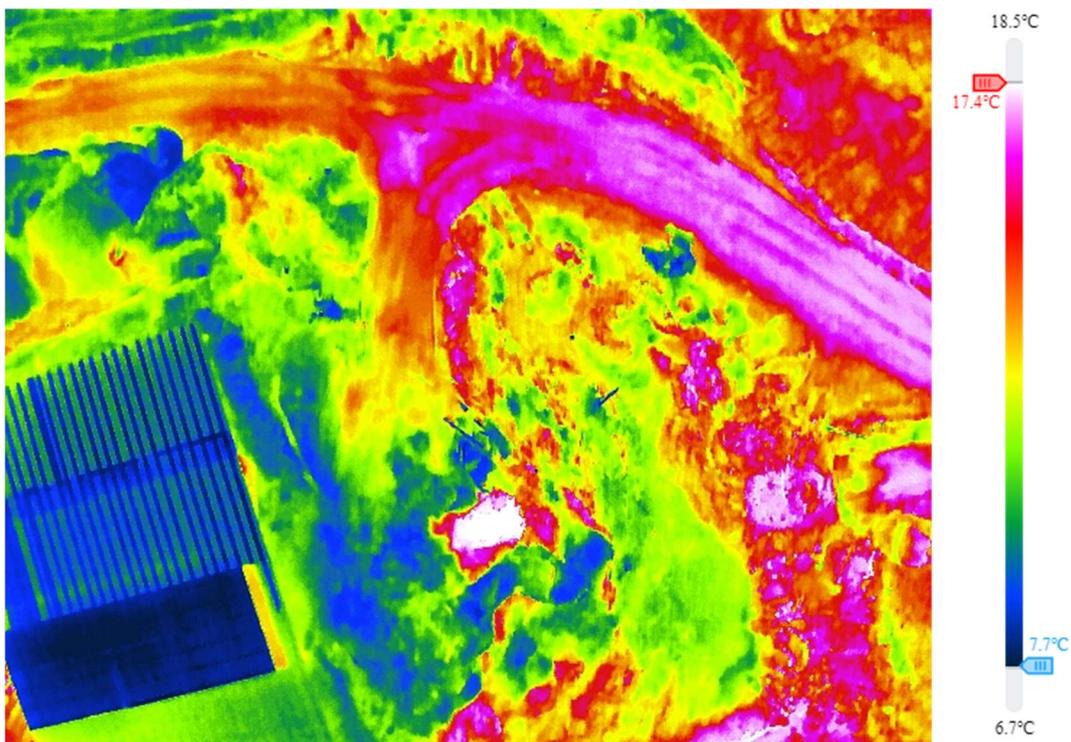


Figura 3 – Exemplo de visualização de arquivo JPG realizado com drone termal DJI.

Fonte: Elaboração própria.

O *software* também possibilita a modificação dos parâmetros ambientais para a conversão das imagens em temperatura, facilitando a calibração durante o pós-processamento. Esses parâmetros incluem distância, umidade, emissividade e temperatura refletida.

Embora permita a visualização da temperatura e forneça noções sobre sua variação ao longo da imagem, o software não possibilita a exportação dessas imagens para um arquivo matricial, como um arquivo TIFF (Tagged Image File Format), por exemplo, utilizados em *software* de geoprocessamento como o QGIS. Além disso, não permite a fusão de imagens para criar mapas que possam proporcionar uma visualização mais abrangente de uma determinada área, nem mesmo visualizar a imagem georreferenciada.

Para exportar os valores de temperatura capturados pelas câmeras térmicas da DJI, a empresa desenvolveu o DJI Thermal SDK. Esse software possibilita o processamento de imagens Radiométricas-JPEG (R-JPEG) de produtos com câmeras infravermelhas DJI. Por meio desse programa, é possível criar aplicações que realizam o pós-processamento das imagens R-JPEG. Este processamento resulta em um arquivo raw, que é um tipo de formato de arquivo rasterizado, mas não são as imagens propriamente ditas. Portanto, é necessário importá-los para um *software* antes de editá-los ou exportá-los como outro arquivo de imagem rasterizado.

Explorando além das aplicações da DJI, o FLIR Thermal Studio é um software amplamente reconhecido para o processamento de imagens térmicas. Por meio dele, é viável criar rapidamente relatórios contendo dezenas de imagens, com modelos, sobreposições e fórmulas completamente personalizáveis. Além disso, o software oferece ferramentas avançadas, como processamento em lote e varinha mágica, que aceleram as tarefas de pós-processamento (FLIR, 2023).

Disponível em versões gratuita e paga, o FLIR Thermal Studio possui algumas limitações na versão gratuita, como a impossibilidade de realizar sobreposição de imagens (Figura 4). Além disso, é importante notar que o software não é diretamente compatível com as imagens R-JPEG geradas por drones da DJI, exigindo um pré-processamento antes de sua utilização no programa.

FLIR Thermal Studio

OPÇÕES DE PLANOS

PARTIDA	STANDARD	PROFISSIONAL Mais populares
US\$ 0 /ano	US\$ 215.99 /ano	US\$ 431.99 /ano
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Visualização e edição de imagens radiométricas ✓ Transmissão e gravação de vídeo não radiométrico ✓ Funções de medição: Ponto, caixa, elipse, linha ✓ Modelos de relatório predefinidos ✓ Função de medição delta X Sobreposições personalizadas de imagens X Modelos de relatórios personalizados ilimitados X Modo de imagem panorama X FLIR Route Creator 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Visualização e edição de imagens radiométricas ✓ Transmitir e editar vídeo radiométrico ✓ Funções de medição: Ponto, caixa, elipse, linha, delta, perfil ✓ Sobreposições personalizadas de imagens ✓ Pré-definidos e até cinco modelos de relatório personalizados X Modo de imagem panorama X FLIR Route Creator 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Visualização e edição de imagens radiométricas ✓ Streaming, gravação e edição de vídeos radiométricos (incluindo streaming duplo) ✓ Funções de medição: Ponto, caixa, elipse, linha, delta, perfil, polígono, polilinha, varinha mágica ✓ Sobreposições personalizadas de imagens ✓ Modelos de relatórios predefinidos e totalmente personalizáveis ✓ Modo de imagem panorama ✓ FLIR Route Creator
CRIAR MINHA CONTA	ASSINE AGORA	ASSINE AGORA

Figura 4 – Planos disponíveis do FLIR Thermal Studio.
Fonte: FLIR, 2023.

Por fim, é relevante mencionar o ATYGEO THERMAL, um software que realiza a conversão das imagens R-JPEG para o formato tif, possibilitando posterior georreferenciamento e a criação de ortomosaicos no aplicativo Pix4DMapper. Contudo, é importante observar que ambos os softwares são onerosos, tornando-se inacessíveis devido aos custos elevados para muitas pessoas.

4. METODOLOGIA

Para o desenvolvimento das etapas desenvolvidas neste trabalho, foram utilizadas imagens térmicas de um levantamento do Drone DJI Mavic 3 Enterprise Thermal (M3T), realizadas em Criciúma, no estado de Santa Catarina. As imagens do levantamento são disponibilizadas no formato R-JPEG, onde os dados radiométricos levantados pela câmera térmica do drone ficam armazenadas nos metadados do arquivo JPEG.

A implementação da rotina para extrair, converter em temperatura, georreferenciar e criar um mosaico final a partir desses dados R-JPEG foi realizada utilizando a linguagem de programação Python. Gerenciada pela PSF (Python Software Foundation), essa linguagem destaca-se por sua simplicidade e robustez (DA SILVA e SILVA, 2019). Além disso, a linguagem Python é amplamente documentada, de fácil acesso e possui uma vasta coleção de bibliotecas de livre acesso, tornando-se uma escolha ideal no contexto de análise de dados provenientes de drones térmicos.

Este capítulo abordará a elaboração do código em Python, detalhando cada etapa do processo. A metodologia será apresentada, discutindo os procedimentos adotados em cada etapa, assim como os resultados parciais. A Figura 5 fornece um fluxograma visual das etapas desenvolvidas, proporcionando uma visão abrangente do processo.

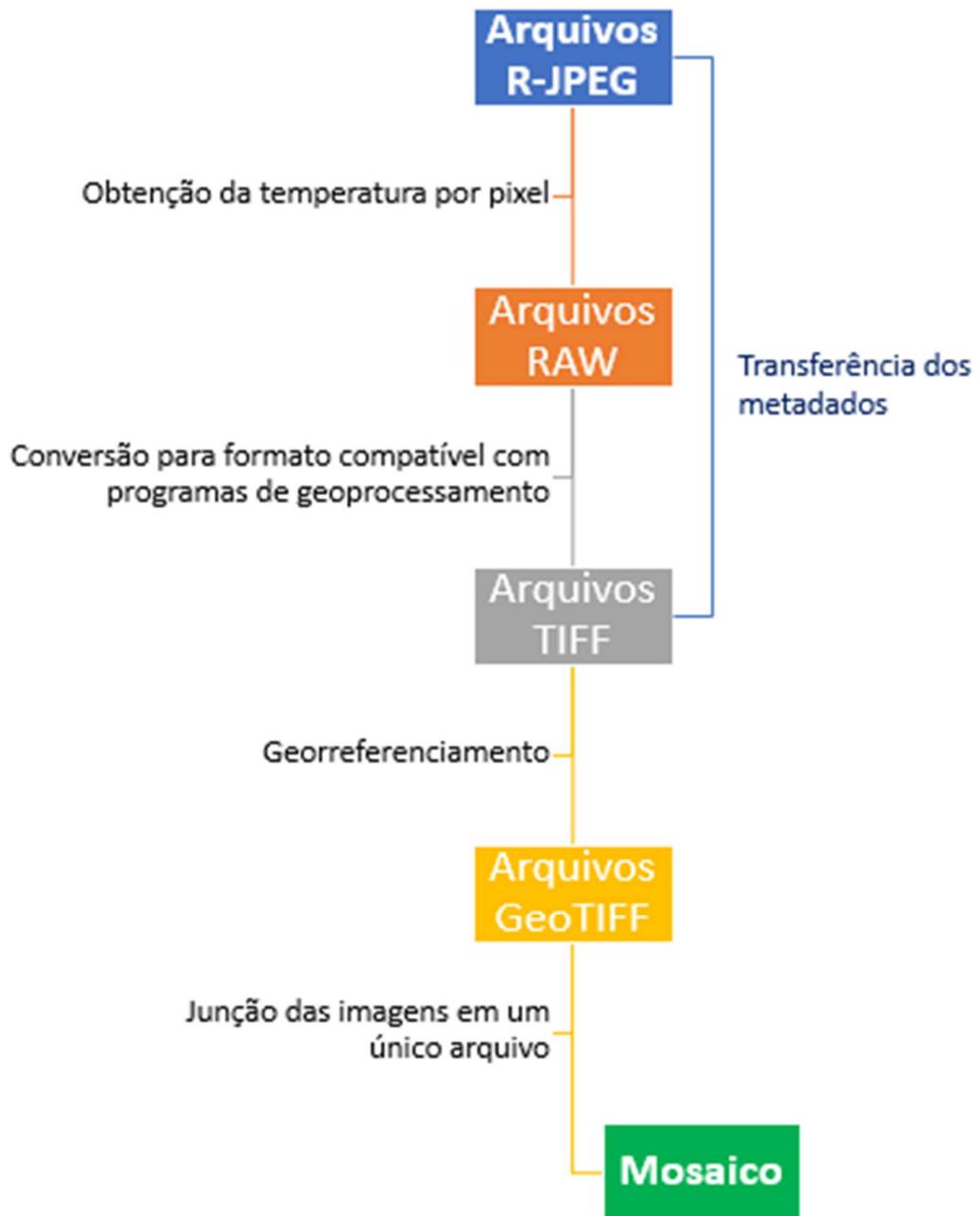


Figura 5 – Fluxograma metodológico para obtenção do mosaico a partir das imagens R-JPEG.

Fonte: Elaboração Própria.

4.1. Extração dos dados térmicos dos arquivos R-JPG

Para compreender a extração dos arquivos R-JPEG, onde é possível apenas verificar visualmente a variação da temperatura, para arquivos RAW, com valores de temperatura para cada pixel, é essencial compreender a estrutura dos metadados dentro de um arquivo. Assim, neste capítulo, estes conceitos serão abordados, juntamente com o processamento necessário para realização desta transformação.

4.1.1. Estrutura geral dos metadados

Os metadados em arquivos JPEG desempenham um papel fundamental na organização e interpretação das informações associadas às imagens, proporcionando detalhes fundamentais para análise e processamento. No contexto das imagens digitais, os metadados referem-se a informações adicionais incorporadas aos arquivos, além dos dados visuais. Esses metadados são essenciais para compreender as condições sob as quais a imagem foi adquirida (DIAS, 2020).

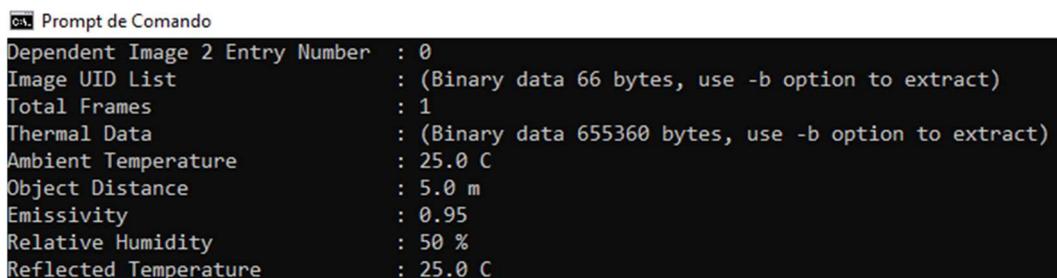
O Exchangeable Image File Format (EXIF) é um padrão amplamente adotado para metadados em arquivos de imagem, como o JPEG (LLORET, *et al.*, 2008). Este padrão pode armazenar informações específicas da câmera, como modelo, fabricante, configurações de exposição (abertura, velocidade do obturador), data e hora da captura, entre outros (SUMNER, 2014). Além disso, pode incluir dados de geolocalização, como latitude, longitude e altitude, quando disponíveis.

Para imagens térmicas capturadas por drones termais, os metadados também desempenham um papel crucial na análise e interpretação das informações térmicas. O EXIF, nesse contexto, pode conter dados relevantes sobre as configurações da câmera térmica, além da emissividade utilizada, distância do alvo, temperatura ambiente e outras informações pertinentes à termografia. Ao considerar estes parâmetros, os metadados auxiliam na calibração das imagens, permitindo a conversão dos valores radiométricos para temperaturas.

Ademais, os metadados geoespaciais possibilitam a integração de imagens térmicas em Sistemas de Informações Geográficas (SIG), armazenando as coordenadas geográficas do ponto de captura da imagem, facilitando análises mais abrangentes e contextualizadas em relação ao ambiente físico. Essa funcionalidade é especialmente valiosa em operações com drones termais, onde a combinação de dados termais e geoespaciais possibilita uma compreensão mais profunda das condições térmicas em áreas extensas.

4.1.2. Metadados do drone DJI M3T

Analisando especificamente as imagens utilizadas neste projeto, obtidas pelo drone DJI M3T, as informações relativas à temperatura em cada imagem R-JPG estão codificadas em formato binário nos metadados do arquivo, com 655.360 bytes, conforme ilustrado na Figura 6. Para decodificar esses dados e visualizar sua representação, a biblioteca “struct” foi empregada, a qual proporciona a capacidade de especificar o formato dos dados binários e convertê-los em estruturas de dados mais acessíveis, como tuplas ou listas.



```
Prompt de Comando
Dependent Image 2 Entry Number : 0
Image UID List : (Binary data 66 bytes, use -b option to extract)
Total Frames : 1
Thermal Data : (Binary data 655360 bytes, use -b option to extract)
Ambient Temperature : 25.0 C
Object Distance : 5.0 m
Emissivity : 0.95
Relative Humidity : 50 %
Reflected Temperature : 25.0 C
```

Figura 6 – Metadados do arquivo R-JPEG.
Fonte: Elaboração própria.

Na interpretação dos dados binários, testou-se alternativas para obtenção de informações de informações em formato inteiro de 16 bits. Essa escolha implica que cada par de bytes presente no arquivo binário será interpretado como um número inteiro de 16 bits. Conforme as especificações fornecidas pelo manual do drone M3T (DJI, 2022), a geração das imagens térmicas é realizada em uma matriz de dimensões 640x512, resultando em 327.680 bytes. Como

precisas de temperatura, abrindo possibilidades em diversos setores, como monitoramento ambiental, agricultura e busca e resgate (DJI, 2023).

Antes de utilizar o DJI Thermal SDK, é necessário garantir que o ambiente de desenvolvimento esteja devidamente configurado. De acordo com o manual, os requisitos incluem, o Visual Studio 2015 para usuários do Windows 10 (versão 1804) e o gcc/g++ 5.4.0 para aqueles que utilizam sistemas baseados em Ubuntu 16.04 LTS. Com o ambiente configurado, é possível realizar uma série de aplicações, sendo a principal a transformação dos dados brutos de radiação emitida em temperatura.

4.1.3. Processamento para obtenção da temperatura

Neste projeto, a extração da radiação emitida, localizada nos metadados dos arquivos térmicos provenientes de imagens R-JPEG, e conversão em dados de temperatura é efetuada através do DJI Thermal SDK, empregando o executável “dji_irp.exe”. Nesse contexto, é necessário que todas as imagens térmicas em formato R-JPEG estejam concentradas em um único diretório, ao passo que os resultados do processamento são salvos em um diretório distinto.

Desta forma, o processamento inicia com um ciclo de iteração sobre cada arquivo presente no diretório de imagens, processando exclusivamente aqueles que possuem a extensão “.JPG” efetuando assim uma filtragem de arquivos de imagem válidos. Para cada arquivo de entrada, o código constrói o caminho completo para o arquivo de saída, realizando a conversão da extensão para “.raw”.

O processo de conversão é concretizado mediante a elaboração de um comando individualizado para cada imagem. Esse comando incorpora o executável “dji_irp.exe” e inclui opções como “-a measure” para especificar a ação de medição, “-s” para indicar o caminho do arquivo de entrada, “-o” para determinar o caminho do arquivo de saída e “--measurefmt float32” para definir o formato da medida como ponto flutuante.

A execução efetiva do comando é realizada utilizando a biblioteca “subprocess”. A opção “shell=True” simplifica a execução do comando no ambiente de terminal, assegurando uma interação eficiente com o DJI Thermal

SDK. Os resultados do processamento consistem em arquivos RAW para cada imagem JPG, armazenados no diretório especificado por “caminho_para_saida”. Esses arquivos RAW contêm informações de temperatura que anteriormente estavam presentes exclusivamente nos metadados dos arquivos R-JPEG. O trecho de código está apresentado na Figura 8.

```
import subprocess
import os

caminho_para_dji_irp = r'C:\Users\lucasc\Desktop\dji_thermal_sdk_v1.4_20220929\utility\bin\windows\release_x64\dji_irp.exe'
caminho_para_imagens = r'sdk/jpg'
caminho_para_saida = r'sdk/raw'

# Lista de arquivos no diretório de imagens
lista_de_arquivos = os.listdir(caminho_para_imagens)

# Loop sobre cada arquivo no diretório de imagens
for arquivo in lista_de_arquivos:
    if arquivo.endswith(".JPG") or arquivo.endswith(".jpg"):
        caminho_completo_entrada = os.path.join(caminho_para_imagens, arquivo)
        nome_saida_raw = os.path.splitext(arquivo)[0] + '.raw'
        caminho_completo_saida = os.path.join(caminho_para_saida, nome_saida_raw)

        # Comando para cada imagem
        comando = f'{caminho_para_dji_irp} -a measure -s {caminho_completo_entrada} -o {caminho_completo_saida} --measurefmt float32'

        # Execute o comando no terminal
        subprocess.run(comando, shell=True)
```

Figura 8 – Código para obter dados de temperatura através do DJI Thermal SDK.

Fonte: Elaboração própria.

4.2. Conversão dos dados de temperatura para arquivos TIFF

A classe "RAW" compreende arquivos que armazenam dados de imagens de forma não compactada, incorporando os valores dos pixels capturados pelo sensor da câmera, além de potencialmente conter informações sobre os metadados relacionados à imagem produzida pela câmera (SUMNER, 2014). Dessa forma, o formato RAW preserva a máxima quantidade de detalhes entre os formatos rasterizados, possibilitando a compressão e a conversão do arquivo para outros formatos.

No âmbito deste projeto, os arquivos no formato RAW gerados pelo DJI Thermal SDK contêm exclusivamente os valores de temperatura associados a cada pixel na imagem. A maioria dos softwares não é capaz de abrir esse tipo de arquivo, tornando necessária a conversão para um formato mais comum, como o formato TIFF (Tagged Image File Format). Adicionalmente, para viabilizar a subsequente realização do georreferenciamento de cada imagem, é necessário recuperar os metadados dos arquivos R-JPEG

4.2.1. Formato TIFF

O formato TIFF é um tipo de arquivo projetado para armazenar imagens no formato raster, proporcionando facilidade de uso e ampla capacidade de descrição de atributos e parâmetros associados aos dados de uma imagem. Fundamentado em entidades lógicas denominadas "Campos TIFF", cada uma identificada por um número, o TIFF utiliza etiquetas para descrever características específicas de uma imagem (VASCONCELLOS, 2002).

As etiquetas têm a função de fornecer informações precisas sobre os dados da imagem, e cada etiqueta possui um significado específico. O formato TIFF suporta a descrição de imagens em diferentes modos, incluindo Bilevel (2 níveis), Grayscale (vários níveis de cinza), Palette-Color (RGB, onde os valores representam índices de uma paleta de cores armazenada separadamente) e Full-Color RGB (cada pixel é composto pelos três valores RGB que formam a própria paleta de cores).

O formato TIFF Básico (Baseline TIFF 6.0) representa o núcleo essencial do formato, e qualquer aplicativo destinado à leitura de imagens TIFF deve ter a capacidade de interpretá-lo integralmente. Essa versatilidade e flexibilidade tornam o formato TIFF uma escolha comum e amplamente suportada para armazenar e compartilhar dados de imagens em uma variedade de contextos e aplicações. No contexto deste projeto, será utilizado o formato TIFF para armazenar e processar os dados de temperatura obtidos pelo drone DJI M3T.

4.2.2. Biblioteca GDAL

A conversão de arquivos RAW para o formato TIFF pode ser realizada por meio de diversas bibliotecas disponíveis em Python e outras linguagens de programação, tais como Python Imaging Library (PIL), OpenCV, LibTIFF, ImageMagick e GDAL (Geospatial Data Abstraction Library). No âmbito deste projeto, optou-se pela utilização da Biblioteca GDAL (ROAULT, *et al.*, 2024) devido à sua ampla aplicabilidade, documentação robusta e capacidade para o processamento, análise e manipulação eficiente de dados geoespaciais.

A GDAL é uma biblioteca de código aberto que fornece uma interface para acessar e manipular dados geoespaciais em diversos formatos. Desenvolvida em C/C++, a biblioteca oferece suporte extensivo para leitura, escrita e transformação de dados raster e vetoriais, tornando-a uma escolha poderosa para a comunidade de geociências (Warmerdam, 2008).

Ainda, esta biblioteca suporta uma ampla variedade de formatos de dados, incluindo TIFF, GeoTIFF, JPEG, RAW e muitos outros. Além disso, oferece funcionalidades avançadas, como projeção cartográfica, transformações geométricas e capacidade de empregar diferentes esquemas de coordenadas.

No contexto deste projeto, a GDAL facilita a conversão de formatos de imagens térmicas, permitindo a transformação de arquivos RAW obtidos do DJI Thermal SDK para formatos mais comuns, como o TIFF. Posteriormente, ela será utilizada também para lidar com informações de projeção e coordenadas geográficas, possibilitando o georreferenciamento preciso de imagens térmicas, permitindo a integração dos dados térmicos em sistemas de informação geográfica (SIG) e análises espaciais.

4.2.3. Processamento para conversão de arquivos RAW para TIFF

Assim, a transformação dos dados de temperatura, armazenados nos arquivos RAW gerados pelo DJI Thermal SDK, para o formato TIFF é realizada pela biblioteca GDAL. O código inicia listando todos os arquivos no diretório especificado para os arquivos RAW, identificados pela extensão `".raw"`. Em seguida, um ciclo de iteração é iniciado, processando cada arquivo RAW individualmente. Para cada arquivo de entrada RAW, o código constrói o caminho completo para o arquivo de saída TIFF, substituindo a extensão `'.raw'` por `'.tiff'`.

Os dados brutos do arquivo RAW são carregados usando a biblioteca NumPy, que facilita a manipulação de *arrays* multidimensionais, que são tipos de sequência que funcionam de forma semelhante a uma lista (HARRIS, *et al.*, 2020). Posteriormente, a biblioteca GDAL é empregada para criar um arquivo TIFF. O driver `'GTiff'` é utilizado para especificar o formato do arquivo, enquanto

as dimensões da imagem, largura e altura, em pixels, são determinadas pelos valores previamente especificados (640 e 510, respectivamente).

A imagem TIFF é então salva no diretório designado para os arquivos TIFF. Este processo de conversão permite que os dados térmicos, inicialmente armazenados em formato RAW, sejam disponibilizados em um formato mais acessível e amplamente suportado, facilitando a análise subsequente e integração em SIG e outras aplicações. O trecho de código é apresentado na Figura 3.

```
import os
import numpy as np
from osgeo import gdal, gdal_array

caminho_para_pasta_raw = 'sdk/raw'
caminho_para_pasta_tiff = 'sdk/tiff'

# Dimensões da imagem (em pixel)
largura = 640
altura = 512

# Lista de todos os arquivos .raw na pasta
arquivos_raw = [f for f in os.listdir(caminho_para_pasta_raw) if f.endswith('.raw')]

# Processamento de cada arquivo .raw
for arquivo_raw in arquivos_raw:
    caminho_completo_entrada = os.path.join(caminho_para_pasta_raw, arquivo_raw)

    # Geração do nome do arquivo de saída .tiff
    nome_saida_tiff = os.path.splitext(arquivo_raw)[0] + '.tiff'
    caminho_completo_saida = os.path.join(caminho_para_pasta_tiff, nome_saida_tiff)

    # Carregamento dos dados brutos do arquivo .raw
    with open(caminho_completo_entrada, 'rb') as file:
        raw_data = np.fromfile(file, dtype=np.float32).reshape((altura, largura))

    # Salva a imagem TIFF usando a biblioteca GDAL
    driver = gdal.GetDriverByName('GTiff')
    dataset = driver.Create(caminho_completo_saida, largura, altura, 1, gdal.GDT_Float32)
    dataset.GetRasterBand(1).WriteArray(raw_data)
    dataset.FlushCache()
    dataset = None # Fecha o datasetD
```

Figura 9 – Código para conversão dos arquivos RAW em TIFF.
Fonte: Elaboração própria.

4.2.4. Transferência dos metadados

Como mencionado anteriormente, o DJI Thermal SDK, através da criação do arquivo RAW, não exporta os metadados do arquivo R-JEG. Dessa forma, é necessário fazer essa transferência para posteriormente ser possível o georreferenciamento das imagens.

Para isso, é utilizado um código que verifica a existência de arquivos JPEG com mesma nomenclatura aos arquivos TIFF. Para cada arquivo JPEG encontrado, o código utiliza a ferramenta ExifTool para transferir as informações de metadados do arquivo JPEG para o arquivo TIFF correspondente, garantindo

uma consistência e atualização eficaz dos dados. O código pode ser visualizado na Figura 10.

O ExifTool é uma biblioteca independente de plataforma, acompanhada de uma aplicação de linha de comando, dedicada à leitura, escrita e edição de metadados em uma ampla variedade de arquivos. Essa ferramenta é essencial para manipular diversos formatos de metadados, além de oferecer suporte aos registros específicos de muitas câmeras digitais, incluindo as câmeras suportadas pela DJI (EXIFTOOL, 2024).

```
import os
import subprocess

caminho_da_pasta_jpg = 'sdk/jpg'
caminho_da_pasta_tiff = 'sdk/tiff'

for arquivo_jpg in os.listdir(caminho_da_pasta_jpg):
    if arquivo_jpg.endswith('.JPG'):
        caminho_completo_jpg = os.path.join(caminho_da_pasta_jpg, arquivo_jpg)

        # Verifica se existe um arquivo TIFF correspondente
        arquivo_tiff = os.path.join(caminho_da_pasta_tiff, f"{os.path.splitext(arquivo_jpg)[0]}.tiff")
        if os.path.exists(arquivo_tiff):
            comando = ['exiftool', '-tagsFromFile', caminho_completo_jpg, '-overwrite_original', arquivo_tiff]
            subprocess.run(comando)
```

Figura 10 – Código para copiar os metadados dos arquivos R-JPEG para os arquivos TIFF.

Fonte: Elaboração própria.

4.3. Conversão para GeoTIFF

Com os arquivos efetivamente convertidos para o formato TIFF, é possível abrir as imagens geradas em diversos softwares de geoprocessamento, como o QGIS ou o ArcGIS. A partir de softwares como esses, é possível extrair a temperatura de cada pixel (Figura 11), analisar a variação de temperatura tanto visual quanto quantitativamente, além de calcular os máximos e mínimos, entre outras aplicações.

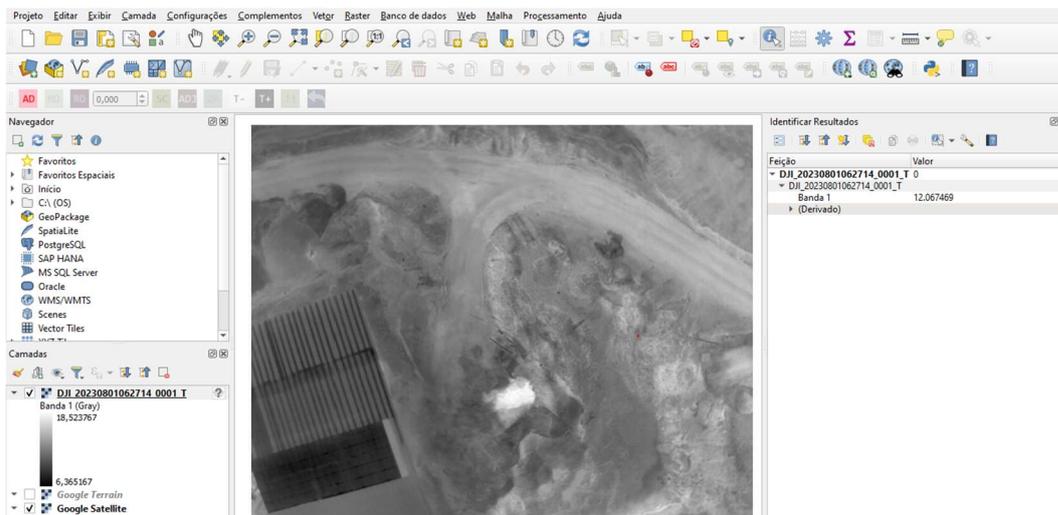


Figura 11 – Identificação da temperatura do pixel no arquivo TIFF.
 Fonte: Elaboração própria.

No entanto, mesmo diante dessas possibilidades, o arquivo ainda não está georreferenciado, o que impede a observação espacial da imagem. Diante disso, é necessária a transformação do arquivo TIFF para o formato GeoTIFF, que possui a capacidade de incorporar informações de georreferenciamento à imagem, de modo a permitir que informações geográficas sejam associadas aos dados da imagem.

4.3.1. Georreferenciamento

A referência espacial engloba as informações cruciais para determinar a localização precisa de um objeto na superfície terrestre, identificando seu posicionamento. Para esse fim, são frequentemente utilizados Sistemas de Referência Terrestre ou Geodésicos (IBGE, 1999), associados a uma superfície que melhor se adapta à forma da Terra, sendo utilizada como base para todos os cálculos de coordenadas.

Quando um arquivo geográfico possui referência espacial, é comumente denominado arquivo georreferenciado, possibilitando sua integração direta em Bancos de Dados Geográficos (BDG). No entanto, na ausência de referência espacial, é necessário realizar o georreferenciamento, que implica operações de transformação geométrica para estabelecer uma relação entre o sistema de referência do arquivo geográfico e um sistema de referência terrestre. Esse

processo pode modificar características como posição, forma ou tamanho (MELO *et al.*, 2014).

O processo de georreferenciamento das imagens capturadas por drones térmicos fundamentou-se no uso do par de coordenadas fornecidas, juntamente com o cálculo do tamanho do pixel, que será apresentado na próxima etapa.

4.3.2. Cálculo do tamanho do pixel

Para o correto georreferenciamento das imagens térmicas, as imagens vem com um par de coordenadas do local onde a foto foi realizada. Este par de coordenadas é o ponto central da imagem, com a latitude e longitude em graus. Porém, para espacializar essa informação, é necessário mais informações do que apenas este ponto central.

Neste sentido, é necessário saber quanto um pixel equivale no mundo real. Para isso, torna-se necessário informações adicionais, como a altura do drone durante o voo, e o campo de visão da câmera térmica, possibilitando o calculo da distancia compreendida pelo ângulo da câmera, como mostra a Figura 12.

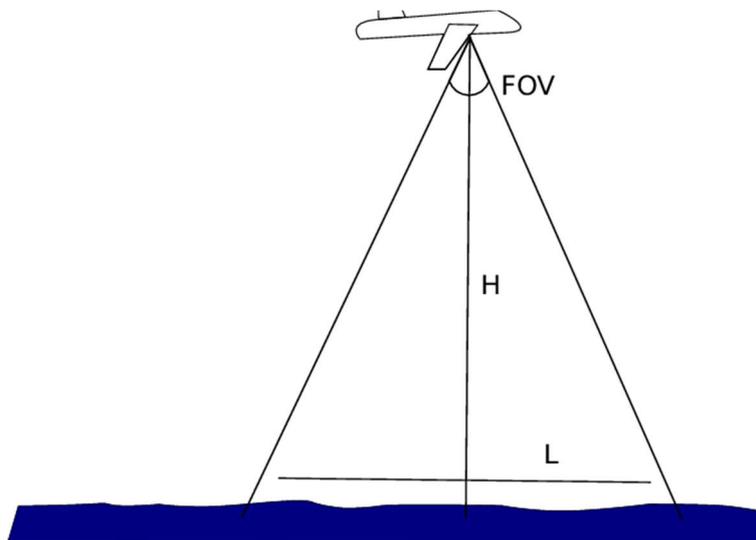


Figura 12 –Relação entre o campo de visão da câmera e a altura do drone com o tamanho da imagem.
Fonte: TAVARES *et al.*, 2013.

O campo de visão, mais conhecido pelo seu termo em inglês “*Field of View*” (FOV), é o ângulo de visão abrangido pela câmera. Com o conhecimento

da altura do drone, uma vez que ele está orientado em 90° no eixo longitudinal (Figura 13), a Equação 1 retorna o valor da largura da imagem. A partir da largura real da imagem, dividindo pelo número de pixels, que é 640, é possível obter o tamanho real de cada pixel.

Equação 1 – Cálculo da largura real da imagem

$$\tan \frac{FOV}{2} = \frac{L}{2 \times H}$$

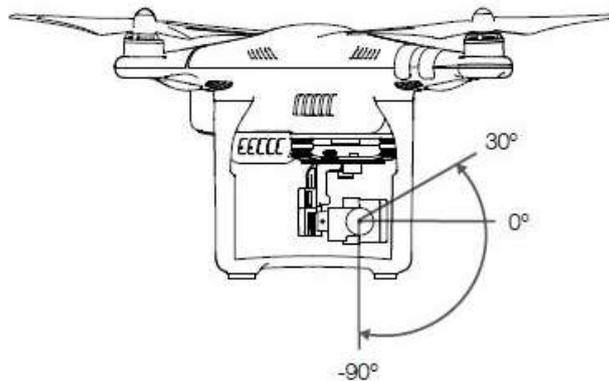


Figura 13 –Orientação longitudinal da câmera para cálculo do tamanho do pixel.

Fonte: Fórum DJI, 2015.

4.3.3. Processamento para conversão dos arquivos Tiff para GeoTIFF

O procedimento de georreferenciamento é aplicado de forma iterativa a todos os arquivos TIFF disponíveis no diretório especificado. Cada arquivo é acessado por meio da biblioteca "tiff", e as informações relativas à posição geográfica são extraídas das *tags* GPS. As coordenadas de latitude e longitude são inicialmente adquiridas no formato de graus, minutos e segundos, sendo posteriormente convertidas para valores decimais para simplificar a interpretação. A Equação 2 apresenta este cálculo.

Equação 2 – Conversão das coordenadas

$$\text{Longitude (graus decimais)} = \text{graus} + \frac{\text{minutos}}{60} + \frac{\text{segundos}}{3600}$$

$$\text{Latitude (graus decimais)} = \text{graus} + \frac{\text{minutos}}{60} + \frac{\text{segundos}}{3600}$$

Além disso, é feito um ajuste nas coordenadas com base nas referências (Norte, Sul, Leste, Oeste) para garantir a correta orientação espacial. O resultado deste processamento consiste nas coordenadas geográficas associadas a cada imagem termal, no sistema de referência WGS84.

Para transformar o sistema de coordenadas geográfico em um sistema de coordenadas projetado, permitindo a utilização do tamanho do tamanho do pixel em metros posteriormente, foi utilizada a biblioteca “pyproj”. No contexto deste projeto, como as fotos utilizadas foram em Criciúma, no estado de Santa Catarina, utilizou-se o sistema de coordenadas projetadas SIRGAS 2000 / UTM zone 22S.

A partir das coordenadas já transformadas para o sistema de coordenadas projetadas, utilizou-se a função “SetGeoTransform”, da biblioteca GDAL. Essa função realiza uma transformação afim do espaço de coordenadas da imagem (linha, coluna), também conhecido como (pixel, linha), para o espaço de coordenadas georreferenciadas (coordenadas projetadas ou geográficas). A função utiliza seis coeficientes para isso (GDAL, 2024):

- GT(0) - coordenada x do canto superior esquerdo do pixel superior esquerdo;
- GT(1) - resolução leste-oeste do pixel ou largura do pixel;
- GT(2) - rotação de linha (tipicamente zero)
- GT(3) - coordenada y do canto superior esquerdo do pixel superior esquerdo;
- GT(4) - rotação de coluna (tipicamente zero);
- GT(5) - resolução norte-sul ou altura do pixel (valor negativo para uma imagem orientada para o norte).

Como as coordenadas extraídas das imagens são as coordenadas centrais, precisou-se calcular as coordenadas do canto superior esquerdo. Para isso, utilizou-se a Equação 3.

Equação 3 – Cálculo das coordenadas do canto superior esquerdo

$$\text{Longitude} = \text{Longitude (centro)} - 0,5 \times \text{Largura (pixel)} \times \text{Tamanho Pixel (m)}$$

$$\text{Latitude} = \text{Latitude (centro)} + 0,5 \times \text{Altura (pixel)} \times \text{Tamanho Pixel (m)}$$

Posteriormente, a função "SetGeoTransform" foi executada, utilizando as coordenadas calculadas como GT(0) e GT(3) para longitude e latitude, respectivamente. Os valores previamente calculados de resolução de pixel foram atribuídos a GT(1) e GT(5). Para GT(2) e GT(4), optou-se por utilizar o valor 0, supondo que a imagem estava orientada para o norte.

A escolha do valor zero foi motivada pela falta de clareza sobre o uso desses dois parâmetros, mesmo considerando que as imagens não estavam alinhadas ao norte. Embora tenham sido realizadas tentativas com valores em graus e radianos, sem êxito em ambos os casos, a opção pelo valor zero foi adotada. Posteriormente, a imagem gerada foi rotacionada para ajustar a orientação conforme necessário. O resultado parcial pode ser visualizado na Figura 14.



Figura 14 –Resultado do georreferenciamento sem rotação.
Fonte: Elaboração própria.

4.3.4. Rotação da imagem

O processo de rotação das imagens tem início com a extração da orientação de voo da aeronave, obtida a partir do bloco XMP dos dados EXIF, mais especificamente do elemento "FlightYawDegree". Esse ângulo permite corrigir a orientação das imagens, garantindo o alinhamento com a direção do voo.

A biblioteca utilizada para realizar a rotação é a "Affine", reconhecida por suas funcionalidades eficientes na manipulação de transformações afins. A função "rotate_gt" é definida com o propósito de calcular a matriz de transformação afim para a rotação da imagem (Figura 15). Esta matriz é derivada do ângulo de orientação de voo previamente obtido.

```
def rotate_gt(affine_matrix, angle, pivot=None):  
    affine_src = Affine.from_gdal(*affine_matrix)  
    affine_dst = affine_src * affine_src.rotation(angle, pivot)  
    return affine_dst.to_gdal()
```

Figura 15 – Função para rotacionar cada arquivo GeoTIFF.
Fonte: Elaboração própria.

Com os parâmetros e bibliotecas definidos, o código procede com a rotação das imagens. A matriz de transformação afim é calculada usando a função "rotate_gt", criando uma cópia do arquivo TIFF original e aplicando a transformação geográfica calculada. O resultado é um GeoTIFF rotacionado, corrigido em termos de orientação e alinhamento geoespacial (Figura 16). Esse arquivo é armazenado na pasta designada para os arquivos rotacionados.

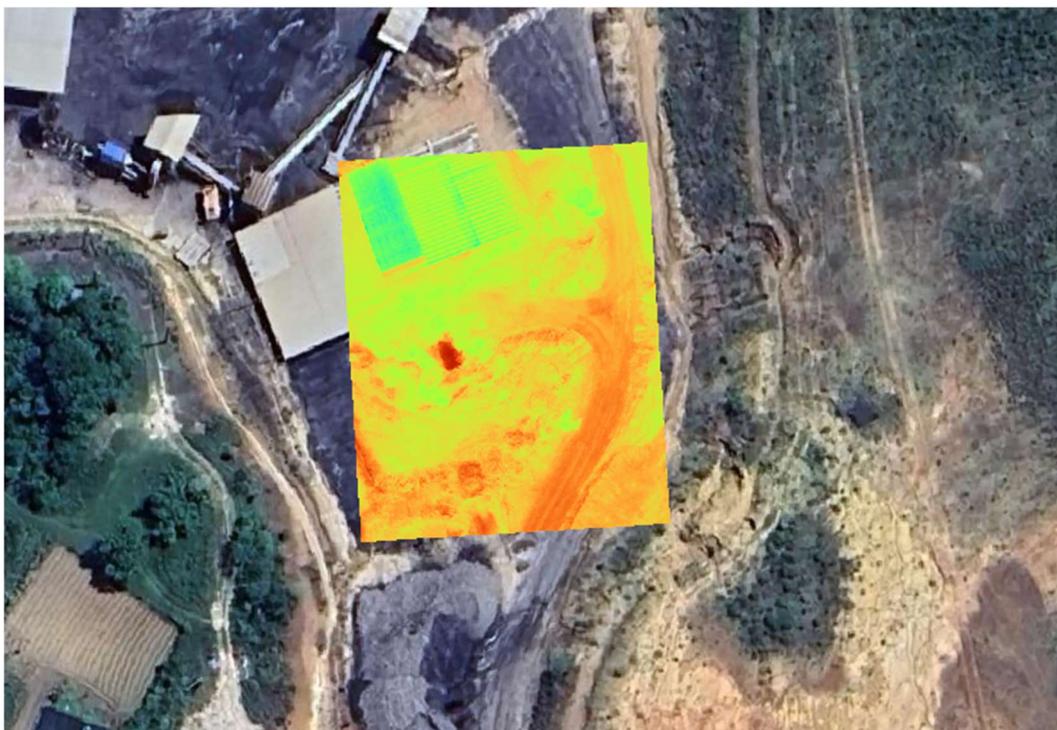


Figura 16 –Resultado do georreferenciamento após a rotação.
Fonte: Elaboração própria.

4.4. Mosaico

O último estágio do processo envolve a criação de um arquivo único contendo os valores de temperatura para cada pixel. Para isso, a partir dos GeoTIFFs georreferenciados e rotacionados, a biblioteca GDAL é empregada novamente para realizar a fusão das imagens para a criação de um mosaico.

Desta forma, o código utilizado indica o local onde os arquivos rotacionados estão armazenados. Em seguida, é definido o critério de busca para identificar os arquivos específicos a serem considerados no mosaico, sendo esse todos os arquivos cujos nomes começam com “r”. Cria-se então o caminho completo para os arquivos de interesse, e obtêm-se a lista de arquivos que correspondem ao critério de busca. A reversão dessa lista é realizada para garantir que a sobreposição das imagens seja feita deixando as primeiras por cima das últimas.

A biblioteca GDAL é então utilizada para criação do mosaico a partir dos arquivos selecionados. A função “gdal.Warp” é empregada para esse propósito,

indicando o nome de saída do mosaico, os arquivos a serem mesclados, e o formato de arquivo do mosaico, que é o GeoTIFF. Algumas opções adicionais são configuradas, como compressão LZW para redução do tamanho do arquivo e a opção "TILED=YES" para otimizar o acesso a dados. Finalmente, o arquivo é salvo e todas as alterações são salvas.

O código utilizado para essa etapa pode ser visualizado na Figura 17. Este procedimento garante a criação de um único arquivo representativo de todas as informações de temperatura, consolidando os dados extraídos dos arquivos R-JPEG, devidamente georreferenciados e rotacionados.

```
dirpath = "sdk/geotiff_rotated"
search_criteria = "r*.tiff"
q = os.path.join(dirpath, search_criteria)
files_to_mosaic = glob.glob(q)
files_to_mosaic.reverse
g = gdal.Warp("sdk/merge/mosaico.tif", files_to_mosaic, format="GTiff",
              options=["COMPRESS=LZW", "TILED=YES"])
g = None
```

Figura 17 – Código para geração do mosaico.
Fonte: Elaboração própria.

5. RESULTADOS

A partir das etapas elaboradas durante o desenvolvimento deste projeto, foi possível obter as imagens georreferenciadas, tanto individuais quanto em formato de mosaico, com os valores de temperatura de cada pixel, em formato compatível com os *softwares* de geoprocessamento mais populares, como o QGIS ou o ArcGIS. Os próximos subcapítulos apresentarão os resultados obtidos e o tempo de processamento do código final.

5.1. Resultados do processamento

Os resultados de conversão dos dados térmicos para os arquivos TIFF, assim como a transferência dos metadados, mostrou-se eficaz. Comparando os valores máximos e mínimos do TIFF com o programa DJI Analysis Tools, chegou-se nos mesmos valores. Esse resultado já era esperado, uma vez que o programa usa o mesmo pacote SDK que foi utilizado no código.

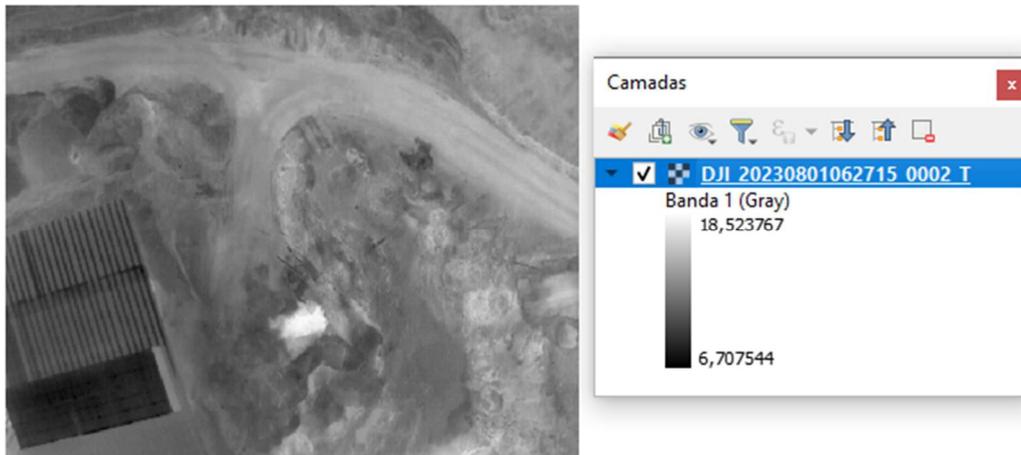
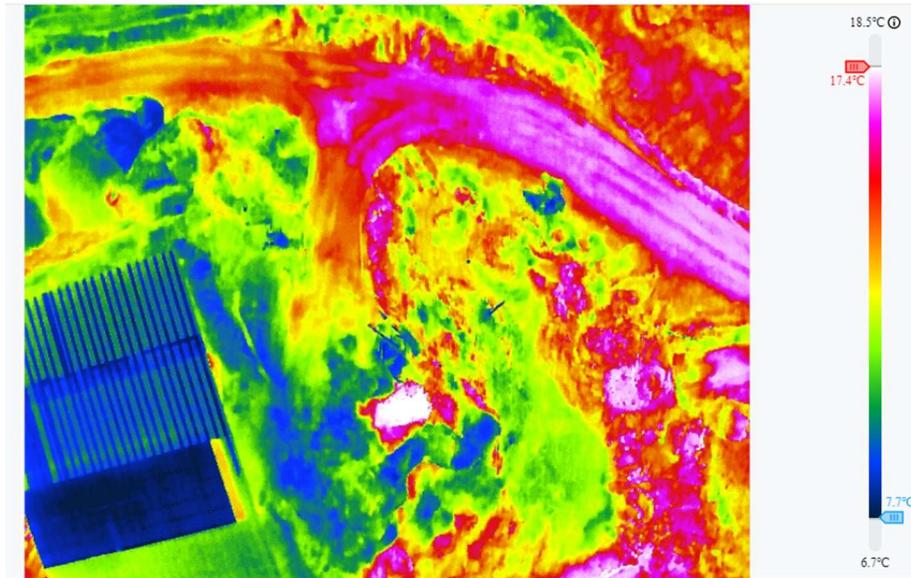


Figura 18 – Comparativo entre os valores obtidos no DJI Analysis Tools 3Tools e no arquivo TIFF gerado.

Fonte: Elaboração própria.

Acerca da transferência dos metadados dos arquivos originais para os arquivos TIFF, também se obteve sucesso, uma vez que todos os dados necessários para o georreferenciamento foram utilizados, como a latitude e longitude, sistema de projeção, ângulo longitudinal de voo e a altitude relativa. Os demais dados, apesar de não terem sido utilizados, também foram transferidos, como especificações da câmera e variáveis do ambiente no dia do levantamento. Futuramente, estes dados podem ser facilmente acessados,

seguindo a mesma lógica utilizada para os parâmetros já obtidos, caso seja necessário para a aplicação desejada.

Em relação ao georreferenciamento, em função de algumas limitações referentes ao processo, como o cálculo do tamanho real do pixel e inclinações no ângulo da câmera, as imagens não ficaram integralmente condizentes com a realidade. No entanto, para a maioria das aplicações, pode-se dizer que o georreferenciamento foi adequado, possibilitando uma análise espacial muito mais precisa do que apenas a imagem sem o georreferenciamento. A Figura 19 traz o resultado do georreferenciamento para uma imagem.



Figura 19 – Resultado do georreferenciamento do arquivo GeoTIFF gerado.

Fonte: Elaboração própria.

Por último, em relação aos mosaicos obtidos, destaca-se que os resultados foram satisfatórios, apesar de carregarem as limitações que acarretam pequenos erros no georreferenciamento os arquivos únicos. Em determinados cenários, analisar as imagens individualmente, antes da geração do mosaico, mostrou-se como uma metodologia adequada para excluir determinadas imagens que não se mostraram adequadas.

Apesar dos erros de sobreposição e deslocamento das imagens no mosaico, a depender da escala de trabalho, o resultado cumpre com o objetivo. A partir dele, é possível escolher uma paleta de cores e representar a imagem com as cores a partir dos valores máximos e mínimos que o mosaico já fornece. Este processo agiliza a análise em áreas maiores, representando claramente a diferença de temperatura em determinados locais.

Ainda, em locais onde a variação de temperatura é muito alta, utilizar uma paleta de cores com os mesmos valores máximos e mínimos para todas as imagens pode reduzir o nível de detalhes das imagens que não possuem este gradiente tão evidente, impossibilitando uma análise mais detalhada. A Figura 20 apresenta um exemplo de um mosaico obtido e de como a escolha dos valores máximos de temperatura afeta na análise visual das diferenças de temperatura das imagens.

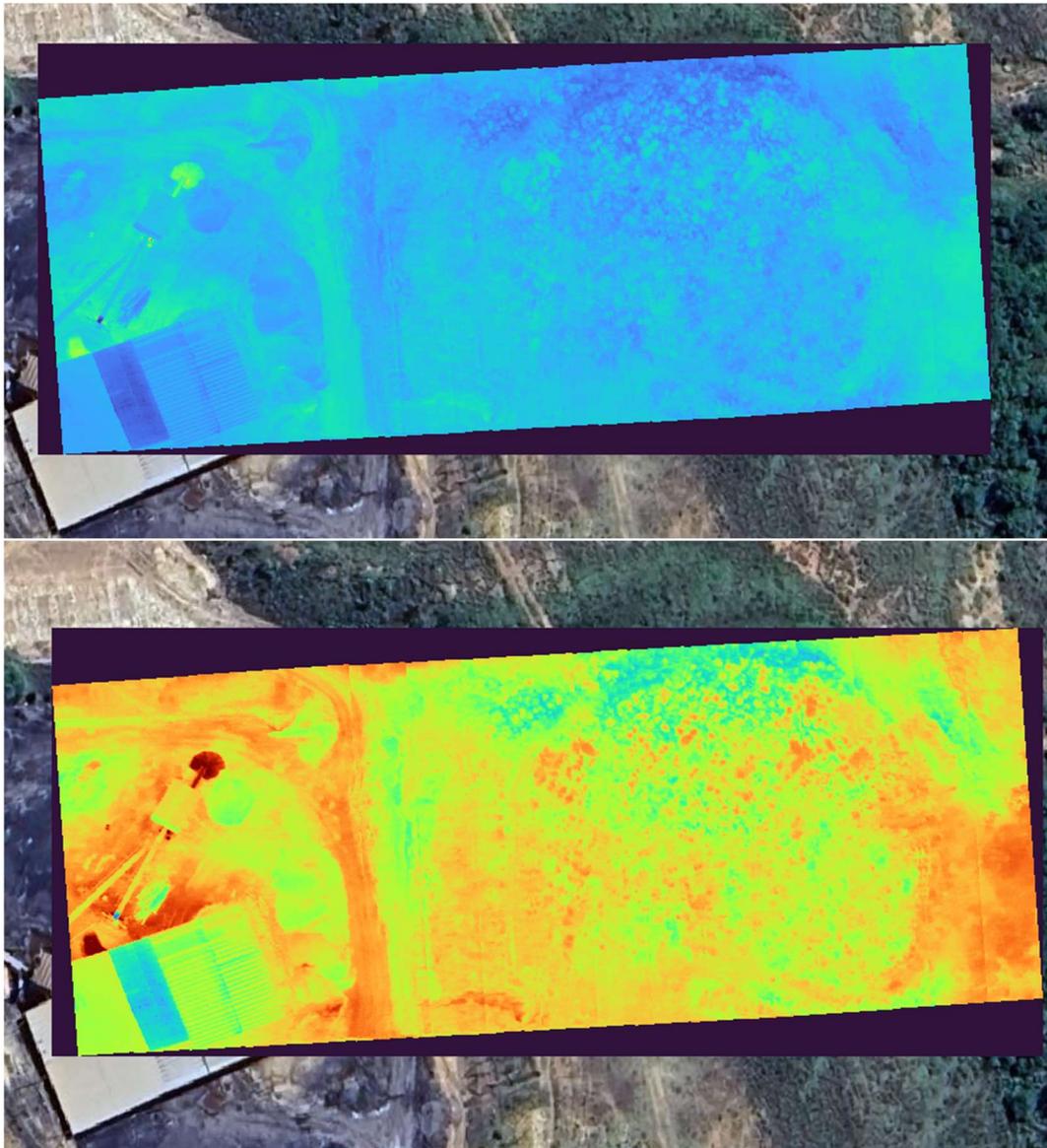


Figura 20 – Comparação entre a escolha de diferentes valores de temperatura máxima na geração da paleta de cores dos mosaicos.

Fonte: Elaboração própria.

5.2. Tempo de processamento

Para análise da duração de processamento do código, foi calculado o tempo necessário para execução de cada etapa do processo, de modo a identificar possíveis aperfeiçoamentos posteriormente. Nesta análise, foram utilizadas 240 imagens R-JPEG, e desconsiderados os tempos necessários para instalar e importar as bibliotecas de cada trecho de código. Os resultados estão apresentados na Tabela 2.

Etapa	Tempo de processamento	
	Segundos	%
Extração dos dados térmicos dos arquivos R-JPG	58,2	10,6%
Conversão dos dados de temperatura para arquivos TIFF	17,1	3,1%
Transferência dos metadados	396,2	72,0%
Georreferenciamento	58,8	10,7%
Elaboração do mosaico	19,9	3,6%
TOTAL	550	100%

Tabela 2 – Tempo de processamento por etapa.
Fonte: Elaboração própria.

O tempo necessário para a transferência dos metadados das imagens R-JPEG para os arquivos TIFF foi o processo que demandou mais tempo entre as etapas, sendo responsável por 72% do tempo de processamento, seguido pelo georreferenciamento e a extração dos dados térmicos, respectivamente. O tempo total para execução do código foi de aproximadamente 9 minutos para as 240 imagens.

Mediante estes resultados, é evidente que diminuindo o tempo de transferência dos metadados, conseqüentemente o tempo de processamento do código irá diminuir consideravelmente. Atualmente, este trecho de código chama subprocessos externos, que podem ser mais demorados do que realizar operações diretamente em Python. Quando se executa um subprocesso externo, o sistema operacional precisa iniciar um novo processo separado para executar o comando desejado, o que envolve uma sobrecarga em termos de tempo e recursos do sistema.

6. DISPONIBILIDADE E APLICAÇÃO DO SOFTWARE

O desenvolvimento do *software*, como um dos objetivos primordiais deste trabalho, visa oferecer uma solução gratuita para o processamento de imagens obtidas por drones termais, promovendo sua aplicabilidade no âmbito da Engenharia Ambiental. Com essa finalidade em mente, a ferramenta desenvolvida encontra-se disponível publicamente no repositório do GitHub, acessível através deste [link](#).

O GitHub é uma plataforma online de desenvolvimento colaborativo, especialmente concebida para hospedar e gerenciar projetos de *software*. Por meio dela, desenvolvedores têm a oportunidade de colaborar em projetos, compartilhar código-fonte, revisar e discutir alterações, além de acompanhar o progresso do desenvolvimento.

Para utilizar o *software*, os usuários necessitarão dos seguintes requisitos:

- **Ambiente Python:** O software foi desenvolvido na linguagem de programação Python. Portanto, é necessário que os usuários tenham o Python instalado em seus sistemas.
 - Recomenda-se o uso da versão mais recente do Python disponível no momento da utilização.
 - Ademais, sugere-se a instalação via Anaconda, que oferece um ambiente de gerenciamento de pacotes chamado “Conda”, que facilita a instalação e atualização de bibliotecas.
- **Bibliotecas Python:** O *software* faz uso de diversas bibliotecas Python para seu funcionamento adequado.
 - É recomendável que os usuários instalem essas bibliotecas utilizando o gerenciador de pacotes “pip” do Python.
 - As bibliotecas necessárias incluem:
 - subprocess
 - os
 - numpy

- gdal
 - affine
 - math
 - ElementTree
 - tifffile
 - pyproj
 - glob
- **GDAL:** O software faz uso intensivo da biblioteca GDAL para manipulação de dados geoespaciais. Portanto, os usuários devem instalar o GDAL em seus sistemas antes de utilizar o *software*.
 - A instalação do GDAL pode variar de acordo com o sistema operacional utilizado, apresentando dificuldades em algumas situações.
 - Recomenda-se seguir as instruções fornecidas no site oficial do GDAL para garantir uma instalação adequada.
 - **DJI Thermal SDK:** A extração dos dados termais das imagens R-JPEG é feita através de um executável disponibilizado pelo DJI Thermal SDK.

Além disso, no repositório será fornecido um manual de uso da ferramenta, porém ainda está em elaboração. Este manual incluirá instruções detalhadas sobre como configurar o ambiente Python, instalar as bibliotecas necessárias e executar o *software*. Ele também incluirá explicações passo a passo sobre como usar cada funcionalidade do *software*, juntamente com exemplos de entrada e saída.

A disponibilização do software no GitHub, juntamente com um manual abrangente, aumenta sua acessibilidade e facilita sua utilização por parte dos usuários interessados, incluindo aqueles com conhecimento limitado em linguagens de programação. Isso também possibilitará que os usuários contribuam para a melhoria contínua do software, aprimorando assim a análise de dados gerados por imagens termais.

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao concluir este projeto, pode-se afirmar que houve êxito na obtenção de imagens georreferenciadas e na criação de mosaicos térmicos a partir de dados R-JPEG. Os resultados obtidos demonstraram eficácia na conversão dos dados térmicos para arquivos TIFF e na transferência de metadados, evidenciada pela concordância dos valores máximos e mínimos com o DJI Analysis Tools.

Embora o georreferenciamento tenha apresentado algumas limitações, os resultados demonstraram-se adequados com a realidade. A análise individual prévia das imagens, selecionando as imagens para elaboração do mosaico, revelou-se uma estratégia satisfatória para melhorar as discrepâncias de sobreposição e deslocamento nos mosaicos.

Como continuidade da pesquisa, sugere-se aprimorar a precisão do georreferenciamento, considerando ajustes do tamanho real do pixel e correções de posicionamento a partir das inclinações da câmera (eixo longitudinal, lateral e vertical). A partir do aprimoramento do georreferenciamento das imagens, a geração do mosaico ficará ainda mais otimizada, proporcionando análises ainda mais precisas.

Destaca-se ainda que o presente projeto se limitou ao georreferenciamento de imagens termais geradas a partir do levantamento de drones em angulação de 90° com o eixo longitudinal, o que de certa forma é uma prática comum, principalmente na área ambiental. Porém, neste sentido, sugere-se explorar o georreferenciamento com angulações variáveis, permitindo uma maior flexibilidade de análises.

Em relação ao tempo de processamento, aponta-se para a necessidade de otimização na transferência de metadados, que representa a maior parcela do tempo total de processamento. Para as outras etapas desenvolvidas, apesar de existir espaço para otimizações, pode-se dizer que o tempo necessário para o processamento não foi um fator significativo. Diante disso, recomenda-se aos futuros desenvolvedores explorar métodos mais eficientes na transferência dos metadados, evitando subprocessos externos para aumentar a eficácia global do código.

Apesar da potencialidade da aplicação de drones termais no contexto da Engenharia Ambiental, seu uso ainda é recente e pouco difundido. Este trabalho, além de fornecer uma ferramenta para o processamento de imagens de drones termais, visa ampliar as discussões sobre o tema, proporcionando uma visão mais abrangente de suas possibilidades na área ambiental.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, Junaid.; EISMA, Jessica A. **Capturing Small-Scale Surface Temperature Variation across Diverse Urban Land Uses with a Small Unmanned Aerial Vehicle**. MDPI, v. 15, n. 8. Universidade de Texas, Estados Unidos. 2023.

AHN, Y.H.; SHANMUGAM, P.; LEE, J.H.; KANG, Y.Q. **Application of satellite infrared data for mapping of thermal plume contamination in coastal ecosystem of Korea**. Comparative Study, v.61, n. 2, p. 186-201. 2006.

ANA. **Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico**. Atlas Irrigação: Uso da água na agricultura irrigada, 2ª edição. Brasília/DF, 2021.

BARBOSA, Vanessa. **Drones podem revolucionar a proteção do meio ambiente**. Exame.com. 23 março, 2016.

CABALLERO ESPEJO J, MESSINGER M, ROMÁN-DAÑOBAYTIA F, ASCORRA C, FERNANDEZ LE, SILMAN M. **Deforestation and Forest Degradation Due to Gold Mining in the Peruvian Amazon: A 34-Year Perspective**. Remote Sensing. 2018

CARVALHO, Eduardo. **Brasil usará drones para vigiar mata na Amazônia e Cerrado**. G1. São Paulo, SP. Julho, 2015.

CHIARELLO, Cássia Gilmara Fraga et al. **Regulação dos veículos aéreos não tripulados para agricultura no Brasil: das competências normativas**. Universidade de Passo Fundo, RS, 2017.

DA SILVA, Cesar Aparecido et al. **Uso de drones para estimar o volume de resíduos sólidos aparentes e diagnosticar as condições ambientais de um aterro sanitário no litoral do estado do paraná-brasil**. Revista Técnico-Científica, n. 25, 2021.

DE SOUZA, Bianca Adriana; CAVICHIOLI, Fabio Alexandre. **A utilização de veículos aéreos não tripulados (VANT) na cultura da cana-de açúcar**. Revista Interface Tecnológica, v. 17, n. 1, p. 444-455, 2020.

DIAS, Danilo Camargo. **Metadados embutidos em fotografias digitais**. Dissertação (Mestrado em Ciência da Informação). Faculdade de Filosofia e Ciências, Marília, SP, 2020.

DJI FORUM. **Gimbal pitch indicator in degrees**. 2017. Disponível em: <https://forum.dji.com/thread-85009-1-1.html> Acesso em: 21 de janeiro de 2024.

DJI FORUM. **Gimbal Range up 30 degrees?** 2015. Disponível em: <https://forum.dji.com/forum.php?mod=viewthread&tid=14878>. Acesso em: 21 de janeiro de 2024.

DJI. **DJI Mavic 3E/3T User Manual v1.0**. 2022. Disponível em: https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3_Enterprise/DJI_Mavic_3E_3T_User_Manual_EN.pdf Acesso em: 20 de janeiro de 2024.

DJI. **DJI Thermal Analysis Tool 3**. User Guide v1.6. 2023. Disponível em: https://dl.djicdn.com/downloads/dji_dtat/20231215/DJI%2BThermal%2BAnalysis%2BTool%2B3_User%2BGuide_en.pdf Acesso em 09 de janeiro de 2024.

DJI. **DJI Thermal SDK**. Disponível em: <https://www.dji.com/br/downloads/softwares/dji-thermal-sdk> Acesso em: 21 de janeiro de 2024.

DJI. **Mavic 2 Enterprise Série, Manual do Usuário v1.8**. 2021. Disponível em: https://dl.djicdn.com/downloads/Mavic_2_Enterprise/20210413/Mavic_2_Enterprise_Series_User_Manual-PTBR.pdf Acesso em: 01 de janeiro de 2024.

DUGDALE, Stephen J.; KELLEHER, Christa A.; MALCOLM, Iain A.; CALDWELL, Samuel.; HANNAH, David M. **Assessing the potential of drone-based thermal infrared imagery for quantifying river temperature heterogeneity**. Hydrological Processes, v. 33, n. 7, p. 1152-1163, 2019.

DUGDALE, Stephen J.; KLAUS, Julian; HANNAH, David M. **Looking to the skies: realising the combined potential of drones and thermal infrared imagery to advance hydrological process understanding in headwaters**. Water Resources Research, v. 58, n. 2, 2022.

EFE. **Cientistas criam sistema de detecção de incêndios por drones**. Exame.com. 26 outubro, 2016.

FAGUNDES, M.; RODRIGUES, A.; IESCHECK, A. L. **Uso de VANT na cartografia: geração de base cartográfica tridimensional**. DRONES E CIÊNCIA, p. 59, 2019.

FERRARA, Claudia et al. **Characterization of terrestrial discharges into coastal waters with thermal imagery from a hierarchical monitoring program**. MDPI, Water, v. 9, n. 7, p. 500, 2017.

GDAL. **Geotransform Tutorial**. Disponível em: https://gdal.org/tutorials/geotransforms_tut.html#geotransform-tutorial Acesso em: 21 de janeiro de 2024.

GHAZOUANI H., CAPODICI F., CIRAOLO G., MALTESE A., RALLO G., PROVENZANO G. **Potential of Thermal Images and Simulation Models to Assess Water and Salt Stress: Application to Potato Crop in Central Tunisia**. Chemical Engineering Transactions, v.58, 709-714, 2017.

HARRIS, C.R., MILLMAN, K.J., VAN DER WALT, S.J, et al. **Array programming with NumPy**. Nature, v. 585, p. 357–362. Setembro, 2020.

HARVEY, Phil. **ExifTool**. 2024. Disponível em: <https://exiftool.org/> Acesso em: 21 de janeiro de 2024.

HOOK, S.J.; CHANDER, G.; BARSİ, J.A.; ALLEY, R.E.; ABTAHI, A.; PALLUCONI, F.D.; MARKHAM, B.L.; RICHARDS, R.C.; SCHLADOW, S.G.; HELDER, D.L. **In-flight validation and recovery of water surface temperature with Landsat-5 thermal**

infrared data using an automated high-altitude lake validation site at Lake Tahoe. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, v. 42, p. 2767–2776. 2004.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Noções Básicas de Cartografia.** Fundação IBGE, Manuais Técnicos em Geociências. v. 1, n. 1. p. 129-130. Rio de Janeiro, 1999.

ISPRS. **International Society for Photogrammetry and Remote System.** STATUTE II. Alemanha, 2022.

JORGE, LA de C.; INAMASU, Ricardo Y. **Uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) em agricultura de precisão.** Embrapa Instrumentação-Capítulo em livro científico, 2014.

KARDASZ, P., DOSKOCZ, J., HEJDUK, M., WIEJKUT, P., & ZARZYCKI, H. **Drones and possibilities of their using.** J. Civ. Environ. Eng, 6(3), 1-7, 2016.

LIMA, Daniele D.; PEREIRA, Luana de M.; SANTOS, Paulo C. dos. **VANTs: um estudo sobre o uso na preservação ambiental.** Simpósio de Pós-Graduação. IFSULDEMINAS, MG, 2017.

LLORET ROMERO, Nuria.; GIMÉNEZ-CHORNET, Vicent.; SERRANO-COBOS, Jorge.; SELLES, Alicia. **Recovery of descriptive information in images from digital libraries by means of EXIF metadata.** Library Hi Tech, v. 26, n. 2, p. 302-315, 2008.

LONGHITANO, George Alfredo. **VANTS para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MARINHO, Carlos Alberto Branco. **Desenvolvimento do classificador Pixel Explorer (PEX), para a discretização de alvos em imagens multiespectrais.** Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) —Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

MEDEIROS NETO, Manoel Pedro de. **Veículos aéreos não tripulados e sistema de entrega: estudo, desenvolvimento e testes.** Dissertação de Mestrado. Brasil, 2016.

MELLO, Caio César de Sousa; SALIM, Daniel Henrique Carneiro; TEIXEIRA, Luiza Procópio Tostes. **Uso de vant como ferramenta auxiliar na gestão integrada de aterros sanitários.** Blucher, v. 4, n. 2, São Paulo, 2017.

MELO, D. H. C. T. B., VOLPI, E. M., SILVA, H. M. DA, MENEZES, L. A., & MOURA, P. V. **Decifrando o georreferenciamento.** Geografia Ensino & Pesquisa, v. 18, n. 3, p. 85–102. 2014.

OPGAL. **Introduction to IR (Part 1): The physics behind thermal Imaging,** 2018.

PRUDKIN, Gonzalo; BREUNIG, Fábio Marcelo. **Drones e Ciência: teoria e aplicações metodológicas-volume I.** Santa Maria, RS: FACOS-UFSM, 2019.

RESOLUÇÃO Nº 232, DE 22 DE MARÇO DE 2022. **Aprova o Plano Nacional de Recursos Hídricos 2022-2040 e dá outras providências.** Diário Oficial da União, 2022.

ROMANO, G.; ZIA, S.; SPREER, W.; SANCHEZ, C.; CAIRNS, J.; ARAUS J. L.; MÜLLER, J. **Use of thermography for high throughput phenotyping of tropical maize adaptation in water stress.** Computers and Electronics in Agriculture, v.79(1): 67-74, 2011.

ROUAULT, E., WARMERDAM, F., SCHWEHR, K., KISELEV, A., BUTLER, H., ŁOSKOT, M., SZEKERES, T., TOURIGNY, E., LANDA, M., MIARA, I., ELLISTON, B., CHAITANYA, K., PLESEA, L., MORISSETTE, D., JOLMA, A., DAWSON, N., BASTON, D., DE STIGTER, C., & MIURA, H. **GDAL (v3.8.3).** Zenodo. 2024.

SIFNAIOS, Ioannis; DRAGSTED, Janne; JENSEN, Adam R. **Thermal inspection of water pit heat storages using drones.** SWC: ISES Solar World Congress. International Solar Energy Society, 2021.

SILVA, D. **Evolução da Fotogrametria no Brasil.** Revista Brasileira de Geomática, Pato Branco, PR. v. 3, n. 2, p.90-105.14 dez, 2015.

SODRÉ, Leonardo. **Drone começa a ser usado no monitoramento de queimadas em Niterói.** O Globo. 05 agosto, 2016.

SUMNER, Rob. **Processing raw images in MATLAB.** Department of Electrical Engineering, University of California Santa Cruz, v. 2, 2014.

TAVARES, J. & SOUSA, R. & ANTUNES BEZERRA SEGUNDO, MARCOS TÚLIO & BERTELLI, G. & SILVEIRA, LUIZ & SANTIAGO, G. & ALSINA, PABLO & SANTOS, A. & DANTAS, J. & SENNA, M. & ALVES DE ALBUQUERQUE, GLAUBERTO LEILSON. **An UAV to Scan Rocket Impact Area for Safety Procedures.** European Space Agency, (Special Publication) ESA SP. on European Rocket and Balloon Programmes. Suíça, 2013.

TELEDYNE FLIR. **FLIR Thermal Studio Suite.** Disponível em: <https://www.flir.com.br/products/flir-thermal-studio-suite/> Acesso em: 11 de janeiro de 2024.

TELEDYNE FLIR. **FLIR Thermal Studio Suite.** Disponível em: <https://www.flir.com.br/products/flir-thermal-studio-suite/> Acesso em: 11 de janeiro de 2024.

TELEDYNE FLIR. **Thermal Camera Specs You Should Know Before Buying.** 2019. Disponível em: <https://www.flir.com/discover/professional-tools/thermal-camera-specs-you-should-know-before-buying/> Acesso em: 11 de janeiro de 2024.

VASCONCELLOS, Ricardo Moacyr de. **GEOTIFF: uma abordagem resumida do formato.** CPRM, 2002.

VIANA, L. A., ZAMBOLIM, L., SOUSA, T. V., & TOMAZ, D. C. (2018). **Potential use of thermal camera coupled in uav for culture monitoring.** Revista Brasileira De Engenharia De Biosistemas, 12(3), 286–298. 2018.

VILLATE, Jaime E. **Espectro Eletromagnético.** Universidade do Porto, Portugal. 2013.

WARMERDAM, F. **Open Source Approaches in Spatial Data Handling.** The Geospatial Data Abstraction Library. Advances in Geographic Information Science, vol 2. Alemanha, 2008.

WIJAYANTOR. D., ARYO ADHI CONDRO, & DEDE AULIA RAHMAN. **Thermal Drone Technology Used to Capture Thermoregulation in Wild Sumatran Elephants.** HAYATI Journal of Biosciences, v. 30, n. 6, p. 1061-1070. 2023.