



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/10.14.12.05-TDI

**CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL DE UMA  
CÂMERA INFRAVERMELHO TERMAL A BORDO DE  
VANT PARA FINS DE ESTIMATIVA DA  
TEMPERATURA DA ÁGUA EM UMA SEÇÃO DO RIO  
PARAÍBA DO SUL, JACAREÍ-SP**

Jéssica Villela Sampaio

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Sensoriamento Remoto, orientada  
pelo Dr. Hermann Johann Heinrich  
Kux, aprovada em 20 de agosto de  
2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3U893C5>>

INPE  
São José dos Campos  
2019

## **PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

## **CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

### **Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

### **Membros:**

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

### **EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/10.14.12.05-TDI

**CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL DE UMA  
CÂMERA INFRAVERMELHO TERMAL A BORDO DE  
VANT PARA FINS DE ESTIMATIVA DA  
TEMPERATURA DA ÁGUA EM UMA SEÇÃO DO RIO  
PARAÍBA DO SUL, JACAREÍ-SP**

Jéssica Villela Sampaio

Dissertação de Mestrado do  
Curso de Pós-Graduação em  
Sensoriamento Remoto, orientada  
pelo Dr. Hermann Johann Heinrich  
Kux, aprovada em 20 de agosto de  
2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3U893C5>>

INPE  
São José dos Campos  
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Sampaio, Jéssica Villela.

Sa47c      Caracterização laboratorial de uma câmera infravermelho termal a bordo de VANT para fins de estimativa da temperatura da água em uma seção do rio Paraíba do Sul, Jacareí-SP / Jéssica Villela Sampaio. – São José dos Campos : INPE, 2019.  
xxviii + 117 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/10.14.12.05-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.  
Orientador : Dr. Hermann Johann Heinrich Kux.

1. Calibração da câmera. 2. Infravermelho termal.  
3. Fotogrametria com VANT. 4. Sensoriamento Remoto.  
5. Temperatura da superfície da água. I.Título.

CDU 528.8.041.3

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

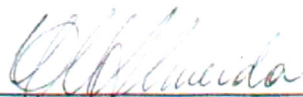
Aluno (a): **Jéssica Vilas Sampaio**

Título: "CARACTERIZAÇÃO LABORATORIAL DE UMA CÂMERA INFRAVERMELHO TERMAL A BORDO DE VANT PARA FINS DE ESTIMATIVA DA TEMPERATURA DA ÁGUA EM UMA SEÇÃO DO RIO PARAÍBA DO SUL, JACAREÍ - SP"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de **Mestre** em

**Sensoriamento Remoto**

Dra. Cláudia Maria de Almeida

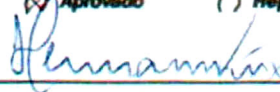


Presidente / INPE / SJCampos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado  Reprovado

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux

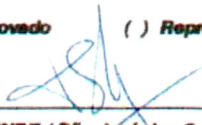


Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado  Reprovado

Dr. Thales Sehn Körting

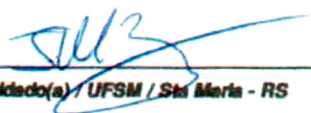


Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado  Reprovado

Dr. Fábio Marcelo Breunig



Convidado(a) / UFSM / São Maria - RS

Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado  Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 20 de agosto de 2019



*“Feliz aquele que transfere o que sabe  
e aprende o que ensina”.*

*Cora Coralina*





A meus pais, Maria Cláudia e Paulo Victor,  
pela grande contribuição em minha vida, ontem, hoje e amanhã

A minha irmã, Camila, e meu amor, José Luiz,  
por acreditarem em mim e sempre me incentivarem a continuar.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por me guiar em todos os momentos da minha vida e me dar forças e saúde para continuar.

Agradeço à minha família. Aos meus pais, Paulo Victor e Maria Cláudia, pelo imenso amor, dedicação e por todas as oportunidades de estudo e conhecimento que me propiciaram. A minha irmã, Camila, que acima de tudo é meu exemplo pessoal e profissional, que me inspira em todas as minhas atitudes. Também deixo meu agradecimento aos meus avós, tios, tias e primos que me permitiram momentos de lazer e descontração. Pela motivação nos momentos difíceis e comemoração por todas as vitórias alcançadas nesta jornada.

Quero agradecer ao meu querido José Luiz, por todo companheirismo e amor, pela compreensão das horas perdidas de convivência para o desenvolvimento desta dissertação de mestrado.

Agradeço ao Dr. Hermann Johann Heinrich Kux pela sua orientação e paciência, pela confiança depositada e por mostrar-me seu grande entusiasmo pela ciência, acreditando em mim em todo momento ao longo do mestrado em Sensoriamento Remoto, bem como disponibilizar seu tempo, atenção e conhecimento. Foi uma honra poder trabalhar nessa parceria.

Agradeço de forma geral ao Instituto de Estudos Avançados (IEAv) por ter cedido a câmera infravermelho termal e pelo VANT, indispensáveis para a realização deste trabalho.

Ao Dr. Ruy Morgado, pelo suporte junto ao Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletro-Ópticos (LaRaC), por todo o aprendizado e todos os cafezinhos.

Aos amigos Capitão Marielcio e Sargento Cláudio, agradeço pelo suporte nos voos com VANT, pela disponibilidade e empenho em ajudar.

Meu agradecimento ao Dr. Elcio Hideiti Shiguemori por mostrar-me o caminho correto em um momento difícil deste trabalho.

Ao Dr. José Renato Garcia Braga, pela prontidão em me auxiliar com os algoritmos utilizados no processamento das imagens termais.

À engenheira Natália Galvão Silva, pela parceria e colaboração em todos as etapas deste trabalho. Confesso que, sem você, as horas passadas dentro do laboratório seriam menos agradáveis e divertidas.

Gostaria também de demonstrar a minha gratidão aos amigos que fiz ao longo deste curso. À Débora, por ser parceira de vida, me animar nos dias que me senti sozinha, longe da minha família, por todos os trabalhos e horas dedicadas aos estudos, pela mascote Alice e por toda a alegria que ela trouxe. À Ana Carolina e Juliana, por estarem sempre me esperando de braços abertos, pelo empréstimo da sala, pela leveza, pelas fugas, pelos papos e por toda a ajuda; vocês tornaram minhas idas a São José dos Campos muito menos cansativa. Ao Wesley, por ter me ensinado, orientado e apoiado na resolução de todos os problemas, principalmente nos scripts e fluxogramas.

Agradeço aos meus colegas de turma que, de alguma forma, me ajudaram na construção e materialização deste trabalho. Em especial, muito obrigada ao Daniel pela paciência e ajuda.

Aos Dr. Thales e Dra. Cláudia Almeida, pelas contribuições e atenção durante a proposta e defesa final desta dissertação; as suas sugestões agregaram imensamente ao crescimento deste estudo. Ao Dr. Marcelo Breunig, pelo seu conhecimento e disposição em participar da banca.

Também sou grata à CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil, pelo apoio financeiro, e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), por ter me aberto as portas para esta oportunidade de crescimento acadêmico.

Finalmente agradeço a todos os professores que participaram da minha formação, desde a infância até o mestrado. Proporcionaram-me os ensinamentos necessários para que hoje eu possa receber este título de Mestre em Sensoriamento Remoto.



## RESUMO

A temperatura da água é um importante parâmetro de sua qualidade, pois influencia a sobrevivência e crescimento de espécies de animais e vegetais nos ecossistemas aquáticos. Atualmente, as medidas obtidas em campo não permitem a cobertura espacial necessária para o monitoramento contínuo deste parâmetro. Assim sendo, sistemas sensores termais com características específicas para a sua integração em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) surgem como uma alternativa para a estimativa e análise da temperatura da superfície da água, devido a sua capacidade de obter imagens aéreas com uma flexibilidade operacional incomparável. Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi testar a aplicabilidade do uso de uma câmera termal de baixo custo acoplada a um VANT na obtenção da temperatura e análise dos efeitos das descargas d'água no canal principal de uma seção paulista do rio Paraíba do Sul, no município de Jacareí (SP). Para alcançar os resultados propostos, foi realizada em laboratório a caracterização da câmera quanto a sua resolução espectral, espacial e radiométrica, antes de sua integração ao sistema imageador. Assim, foi possível identificar os reais limites de operação do sistema sensor termal, bem como obter a função de conversão de valores de ND em valores de temperatura (°C). Após a aquisição das imagens através do levantamento aéreo, as mesmas foram processadas por meio do método de registro automático de imagens utilizando os algoritmos SIFT e RANSAC. Apesar de este método apresentar resultados consistentes quando utilizado em imagens aéreas de áreas urbanas, neste estudo não foi possível identificar um número de pontos suficientes no canal principal do curso da água devido a homogeneidade da imagem, gerando um mosaico pouco preciso. A degradação das imagens termais causada pelas características da lente da câmera e a baixa resolução espacial influenciou na capacidade de estimar a temperatura da superfície da água, bem como a detecção errônea de mudanças na temperatura. Contudo, este estudo sugere o potencial eminente do uso de câmeras termais a bordo de VANT para a melhor compreensão da variabilidade da temperatura da superfície da água.

Palavras-chave: Calibração da câmera. Infravermelho termal. Fotogrametria com VANT. Sensoriamento Remoto. Temperatura da superfície da água. Detecção de mudanças de temperatura.





# **LABORATORY CHARACTERIZATION OF AN INFRARED THERMAL CAMERA ABOARD UAV FOR THE PURPOSE OF ESTIMATING WATER TEMPERATURE IN A SECTION OF THE PARAÍBA DO SUL RIVER, JACAREÍ-SP**

## **ABSTRACT**

Water temperature is an important parameter of water quality since it influences the survival and growth of animal and plant species in river ecosystems. Current in situ measurements do not allow the spatial coverage needed for a continuous monitoring. Therefore, thermal infrared sensor systems with specific characteristics for its integration aboard Unmanned Aerial Vehicles (UAV) are an efficient alternative for estimating and assessing the water temperature due to their ability to obtain aerial images with a good operational flexibility. In this context, the aim of this work is to test the applicability of a low cost TIR camera coupled to a UAV to estimate and investigate river water temperature and the effects of wastewater discharges in an important stretch of the Paraíba do Sul river, Jacareí (SP). To achieve the proposed results, the camera was analyzed in a laboratory for its spectral, spatial and radiometric resolution. Thus, it was possible to identify the real operating limits of the thermal sensor system, as well as to obtain the function for converting DN to temperature values. After the image acquisition by an UAV, the images were processed by the automatic image mosaicing method using SIFT and RANSAC algorithms. Although the method presents consistent results when using aerial images of urban areas, in this study an insufficient number of identification key points were obtained in the river channel, due to image homogeneity. The thermal image degradation caused by lens characteristics and low spatial resolution influenced the ability to estimate water surface temperature as well as the detection of different flows. It demonstrates that new approaches should be taken to achieve more accurate results.

**Keywords:** Camera calibration. Thermal infrared. Photogrammetry UAV. Remote sensing. Water surface temperature. Wastewater detection.



## LISTA DE FIGURAS

|   | <u>Pág.</u> |
|---|-------------|
| Figura 2.1 - Direção de propagação da radiação eletromagnética na forma de onda, em função das oscilações dos campos magnético (M) e elétrico (E). ....                             | 6           |
| Figura 2.2 - Espectro eletromagnético. ....   | 6           |
| Figura 2.3 - Emissividade espectral de um Corpo Negro, um Corpo Cinza e um Corpo Real hipotético. ....  | 8           |
| Figura 2.4 - Curva de distribuição das intensidades de energia radiante emitidas por fontes de radiação com diferentes temperaturas. ....   | 10          |
| Figura 2.5 - Componentes de um sistema sensor eletro-óptico. ....   | 15          |
| Figura 2.6 - Conceito de FOV e IFOV. ....   | 19          |
| Figura 2.7 - Conceito de resolução espacial para um sensor eletro-óptico, em que a transição da temperatura é representada por tons de cinza (alta/claro e baixa/escuro). ....      | 20          |
| Figura 2.8 - Relação ESF e MTF. ....  | 21          |
| Figura 2.9 - Parâmetros de orientação exterior de um sensor fotogramétrico a bordo de uma plataforma aérea. ....  | 22          |
| Figura 2.10 - Representação gráfica do procedimento de obtenção das DoGs para diferentes oitavas de uma imagem. ....  | 28          |
| Figura 2.11 - Detecção de um ponto extremo, máximo e mínimo, quando comparado aos seus vizinhos no espaço-escala. ....  | 28          |
| Figura 2.12 - Exemplo de seleção de pontos chaves em uma imagem, onde eles são representados por vetores que fornecem informações sobre a localização, magnitude e orientação. .... | 29          |
| Figura 2.13 - Exemplo de construção do descritor do ponto-chave. ....   | 30          |
| Figura 2.14 - Exemplo de correspondência entre imagens ao utilizar o algoritmo detector SIFT. ....  | 31          |
| Figura 2.15 - Os principais fatores naturais e antrópicas que influenciam o regime térmico em ambientes lóticos. ....   | 34          |

|   |    |
|---|----|
| Figura 2.16 - Processos de transferência de calor entre a superfície da água e o ambiente ao entorno, nas interfaces ar/água e leito/água.....  | 37 |
| Figura 3.1 - Área do estudo no município de Jacareí/SP. ....  | 40 |
| Figura 4.1 - Instrumentos utilizados em laboratório para a caracterização radiométrica, espectral e espacial da câmera FLIR Duo.....  | 46 |
| Figura 4.2 - Matrice 600 Pro, veículo aéreo não tripulado (VANT) utilizado para a aquisição das imagens termais aéreas. ....  | 47 |
| Figura 4.3 - Fluxograma da metodologia utilizada neste estudo para a análise da temperatura da superfície da água.....  | 48 |
| Figura 4.4 - Esquema do arranjo experimental utilizado para a caracterização espectral da câmera FLIR Duo, em que: a) FLIR Duo; c) fonte infravermelho; d) monocromador; e e) <i>chopper</i> mecânico.....  | 49 |
| Figura 4.5 - Esquema do arranjo experimental utilizado para a caracterização espectral do detector de referência, <i>Judson</i> , sendo c) fonte infravermelho; d) monocromador; f) <i>chopper</i> SR540; g) amplificador; h) osciloscópio; i) filtro 730 nm; e j) detector <i>Judson</i> ..... | 50 |
| Figura 4.6 - Esquema do arranjo experimental utilizado para a caracterização radiométrica da câmera FLIR Duo, sendo: a) FLIR Duo e b) Corpo Negro de Área Extensa. ....   | 52 |
| Figura 4.7 - Esquema do arranjo experimental para a caracterização espacial da câmera termal, sendo: a) FLIR Duo; b) Corpo Negro de Área Extensa; e k) alvo vazado.....   | 53 |
| Figura 4.8 - Planejamento do voo realizado com o <i>software Ground Station Pro</i> para a aquisição das imagens termais aéreas sobre o rio Paraíba do Sul.....   | 54 |
| Figura 5.1 - Sinal, em ND, registrado pelo sistema sensor termal da câmera FLIR Duo ( $S_{sensor}$ ) em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ).....  | 60 |
| Figura 5.2 - Transmitância, em porcentagem, do filtro ( $FRE_{filtro}$ ) utilizado na caracterização espectral do detector <i>Judson</i> . ....   | 60 |
| Figura 5.3 - Amplitude de tensão obtida pelo detector <i>Judson</i> ( $S_{ref}$ ) em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ).....   | 61 |
| Figura 5.4 - Função de Resposta Espectral do detector <i>Judson</i> ( $FRE_{ref}$ ) em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ). ....  | 62 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5.5 - Função de Resposta Espectral normalizada do sistema sensor termal da câmera FLIR Duo ( $FRE_{\text{sensor}}$ ) em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ), obtida por meio da caracterização espectral.....      | 62 |
| Figura 5.6 - Radiância medida pelo sensor da câmera, para cada temperatura ajustada no Corpo Negro, em função do ND médio das imagens termais. ....   | 65 |
| Figura 5.7 - Função de conversão entre temperatura termodinâmica e o ND obtido pelo sistema sensor termal da câmera FLIR Duo, considerando a emissividade constante do Corpo Negro de Área Extensa ( $\varepsilon = 0,98$ ). .... | 66 |
| Figura 5.8 - Diferença entre as temperaturas ajustadas ao Corpo Negro e àquelas estimadas pela função de conversão proposta nos manuais do fabricante da câmera FLIR Duo. ....  | 67 |
| Figura 5.9 - MTFs verticais (MTF V) e horizontais (MTV H) do sensor termal da câmera FLIR Duo para diferentes distâncias. ....  | 68 |
| Figura 5.10 - MTF do sensor termal da câmera FLIR Duo em função das distâncias 0,30 m, 0,50 m, 0,75 m e 1,0 m.....  | 69 |
| Figura 5.11 - Par de imagens RGB e TIR obtidas pela câmera FLIR Duo por meio de um levantamento aéreo realizado sobre um trecho do rio Paraíba do Sul. .  | 70 |
| Figura 5.12 - Par de imagens TIR e RGB obtidas pela câmera FLIR Duo em suas dimensões originais.....  | 71 |
| Figura 5.13 - Par de imagens RGB e TIR obtidas com a câmera FLIR Duo após o seu pré-processamento.....  | 72 |
| Figura 5.14 - Imagem resultante do empilhamento ( <i>stacking</i> ) das bandas espectrais, em que: (a) é a banda 4 (TIR) em ND; e (b) é a composição RGB das bandas 1, 2 e 3.....   | 72 |
| Figura 5.15 - Mosaico gerado do processamento das imagens de quatro bandas espectrais no <i>software PhotoScan</i> , em que (a) é o mosaico TIR e (b) a composição colorida RGB das bandas 1, 2 e 3.....                          | 73 |
| Figura 5.16 - Exemplo de pontos homólogos mal distribuídos identificados em duas cenas consecutivas. ....   | 75 |
| Figura 5.17 - Pontos homólogos identificados a partir da execução dos algoritmos SIFT e RANSAC combinados. ....   | 76 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 5.18 - Mosaico termal gerado a partir de duas imagens TIR aéreas consecutivas por meio da combinação dos algoritmos SIFT e RANSAC.....   | 77 |
| Figura 5.19 - Pontos homólogos identificados entre um mosaico gerado de duas imagens RGB e uma nova imagem.....   | 77 |
| Figura 5.20 - Mosaico termal gerado a partir de três imagens TIR aéreas consecutivas por meio da combinação dos algoritmos SIFT e RANSAC.....   | 78 |
| Figura 5.21 - Espacialização das áreas escolhidas para a análise dos padrões de temperatura do canal principal do rio Paraíba do Sul, bem como os dados de temperatura obtidos em campo.....                          | 80 |
| Figura 5.22 - Estimativa da temperatura (°C) da superfície da água do rio Paraíba do Sul na Área 1, próxima ao lançamento de um efluente ao canal principal do corpo hídrico.....                                     | 81 |
| Figura 5.23 - Pontos de mudança da temperatura identificados na cena referente a Área 1 desta análise de padrão de temperatura. ....  | 83 |
| Figura 5.24 - Imagem RGB utilizada na identificação visual de diferentes fluxos (correntezas) ao longo do canal principal do rio Paraíba do Sul. ....   | 85 |
| Figura 5.25 - Estimativa da temperatura (°C) da superfície da água do rio Paraíba do Sul na Área 2, onde percebe-se a existência de um fluxo de água com coloração e temperatura diferente da correnteza do rio. .... | 86 |
| Figura 5.26 - Pontos de mudança de temperatura identificados na cena referente a Área 2 desta análise de padrão de temperatura da superfície da água no rio Paraíba do Sul.....                                       | 87 |

## LISTA DE TABELAS

|  | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| Tabela 4.1 - Especificações técnicas dos sensores pertencentes à câmera FLIR Duo.....  | 44          |
| Tabela 5.1 - Parâmetros estatísticos dos valores de ND em função da temperatura ajustada no Corpo Negro de Área Extensa, obtidos por meio da caracterização radiométrica. .... | 64          |
| Tabela 5.2 - Valores de modulação horizontal (MTF H), vertical (MTF V) e resultante (MTF) na frequência de <i>Nyquist</i> . ....   | 69          |





## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

|       |  |
|-------|--|
| ASPRS | <i>American Society for Photogrammetry and Remote Sensing</i>              |
| CAPES | Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior                |
| CN    | Corpo Negro  |
| CSN   | Companhia Siderúrgica Nacional   |
| DJI   | <i>Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co.</i>                     |
| DN    | <i>Digital Level</i>   |
| ESF   | <i>Edge Spread Function</i>  |
| ETA   | Estação de Tratamento de Água  |
| FLIR  | <i>Forward Looking Infrared</i>  |
| FOV   | <i>Field of View</i>   |
| FRE   | Função de Resposta Espectral   |
| GNSS  | <i>Global Navigation Satellite System</i>                                  |
| IBGE  | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística                            |
| IEAv  | Instituto de Estudos Avançados da Aeronáutica                              |
| IFOV  | <i>Instantaneous Field of View</i>   |
| INPE  | Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais                                  |
| IV    | Infravermelho  |
| JPEG  | <i>Joint Photographics Experts Group</i>                                   |
| LaRaC | Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletro-<br>ópticos |
| MBR   | Método da Banda de Referência  |
| MCC   | Método do Corpo Cinza  |
| MDT   | Modelo Digital do Terreno  |
| MG    | Minas Gerais   |
| MTF   | <i>Modulation Transfer Function</i>  |
| ND    | Nível Digital  |
| NEM   | <i>Normalized Emissivity Method</i>  |
| NOR   | <i>Emissivity Normalization Method</i>                                     |
| NTSC  | <i>National Television System Committe</i>                                 |
| PAL   | <i>Phase Alternation Line</i>  |

|        |   |
|--------|---|
| RANSAC | <i>Random Sample Consensus</i>                          |
| RE     | Razão Espectral   |
| RGB    | <i>Red, Green and Blue</i>                              |
| RMVPLN | Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte |
| RSR    | Razão Sinal Ruído                                       |
| RTK    | <i>Real Time Kinematic</i>                              |
| SAEE   | Serviço Autônomo de Água e Esgoto                       |
| SfM    | <i>Structure from Motion</i>                            |
| SIFT   | <i>Scale Invariant Feature Transform</i>                |
| SP     | São Paulo   |
| SURF   | <i>Speeded Up Robust Features</i>                       |
| TES    | <i>Temperature/Emissivity Separation Method</i>         |
| TIFF   | <i>Tagged Image File Format</i>                         |
| TIR    | <i>Thermal Infrared</i>                                 |
| TISI   | Índice Espectral Independente da Temperatura            |
| UAV    | <i>Unmanned Aerial Vehicle</i>                          |
| UMI    | Unidade de Medição Inercial                             |
| VANT   | Veículo Aéreo Não Tripulado                             |
| VDC    | <i>Voltage Direct Current</i>                           |
| VOx    | Óxido de Vanádio  |



## SUMÁRIO

|  | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| 1 INTRODUÇÃO.....  | 1           |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....                                    | 5           |
| 2.1 Radiação eletromagnética no infravermelho termal.....        | 5           |
| 2.1.1 Emissividade.....  | 7           |
| 2.1.2 Temperatura cinética e temperatura radiante .....          | 8           |
| 2.1.3 Leis físicas da radiação termal .....                      | 9           |
| 2.2 Sistemas sensores termais.....                               | 14          |
| 2.2.1 Resolução espectral .....                                  | 16          |
| 2.2.2 Resolução radiométrica .....                               | 18          |
| 2.2.3 Resolução espacial.....                                    | 19          |
| 2.3 Fotogrametria com VANT .....                                 | 21          |
| 2.4 Análise e monitoramento de temperatura da água .....         | 32          |
| 2.4.1 Fatores que influenciam a temperatura da água .....        | 33          |
| 2.4.2 Variabilidade espaço-temporal da temperatura da água ..... | 35          |
| 2.4.3 Processos de transferência de calor.....                   | 37          |
| 3 ÁREA DE ESTUDO .....   | 39          |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS .....                                      | 43          |
| 4.1 Materiais .....  | 43          |
| 4.1.1 Câmera FLIR Duo.....                                       | 44          |
| 4.1.2 Equipamentos empregados no laboratório .....               | 45          |
| 4.1.3 Veículo aéreo não tripulado (VANT) .....                   | 46          |
| 4.2 Métodos.....   | 47          |
| 4.2.1 Caracterização da câmera FLIR Duo .....                    | 49          |
| 4.2.1.1 Caracterização espectral.....                            | 49          |
| 4.2.1.2 Caracterização radiométrica.....                         | 51          |
| 4.2.1.3 Caracterização espacial.....                             | 52          |
| 4.2.2 Levantamento aéreo .....                                   | 53          |
| 4.2.3 Pré-processamento das imagens termais aéreas.....          | 55          |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 4.2.4 | Processamento das imagens termais aéreas .....   | 55  |
| 4.2.5 | Levantamento em campo .....  | 57  |
| 4.2.6 | Determinação da temperatura cinética da água .....   | 57  |
| 4.2.7 | Detecção de diferenças de temperaturas .....   | 58  |
| 5     | RESULTADOS E DISCUSSÃO .....   | 59  |
| 5.1   | Caracterização do sistema sensor.....  | 59  |
| 5.1.1 | Caracterização espectral .....   | 59  |
| 5.1.2 | Caracterização radiométrica .....  | 64  |
| 5.1.3 | Caracterização espacial.....   | 67  |
| 5.2   | Levantamento aéreo .....   | 70  |
| 5.3   | Pré-processamento das imagens aéreas .....   | 71  |
| 5.4   | Processamento das imagens aéreas.....  | 72  |
| 5.5   | Análise dos padrões de temperatura da superfície da água.....  | 79  |
| 5.5.1 | Área 1: lançamento de efluente .....   | 80  |
| 5.5.2 | Área 2: fluxo com diferente temperatura e coloração .....  | 85  |
| 6     | CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS .....  | 89  |
|       | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....   | 93  |
|       | APÊNDICE A - ROTINA DE CÁLCULO DO PRÉ-PROCESSAMENTO DAS<br>IMAGENS RGB.....                                  | 107 |
|       | APÊNDICE B - ROTINA DE CÁLCULO DO PRÉ-PROCESSAMENTO DAS<br>IMAGENS TIR.....                                  | 109 |
|       | APÊNDICE C - ROTINA DE CÁLCULO DO EMPILHAMENTO DAS BANDAS<br>DAS IMAGENS RGB E TIR.....                      | 111 |
|       | APÊNDICE D - ROTINA DE CÁLCULO PARA O PROCESSAMENTO DAS<br>IMAGENS ATRAVÉS DOS ALGORITMOS SIFT E RANSAC..... | 113 |
|       | APÊNDICE E - ROTINA DE CÁLCULO PARA O PROCESSAMENTO DAS<br>IMAGENS ATRAVÉS DOS ALGORITMOS SIFT E RANSAC..... | 115 |



## 1 INTRODUÇÃO

Em um ecossistema aquático, a temperatura da água é um parâmetro muito importante, pois intervém na taxa de crescimento, distribuição e desenvolvimento de espécies aquáticas e aquelas que residem no entorno (CAISSIE, 2006; FRICKE; BASCHEK, 2015; FANTIN-CRUZ et al., 2010; HANDCOCK et al., 2012).

Atualmente, na maioria dos córregos e rios, as medidas de temperatura da água são obtidas em campo, através de estações de qualidade distribuídas ao longo do corpo hídrico. Com isso, descargas de água entre as estações de medição podem passar despercebidas, pois quando se misturam ao fluxo principal do rio a diferença original da temperatura entre os fluxos é reduzida. Portanto, através dessa abordagem obtêm-se informações limitadas quanto à distribuição espacial da temperatura da água (FRICKE; BASCHEK, 2015; CHERKAUER et al., 2005).

O sensoriamento remoto termal, através da aquisição, processamento e interpretação de dados adquiridos na faixa espectral do infravermelho, permite caracterizar o comportamento térmico dos alvos. Por essa razão, esta técnica tem sido bastante utilizada para a obtenção e monitoramento da temperatura de alvos terrestres nos mais diversos cenários, como mineração (VICENTE; FILHO, 2010), agricultura (LUZ, 2005; GONZALEZ-GUGO et al., 2013; BELLVERT et al., 2014; MAES et al., 2017); monitoramento ambiental (FRICKE; BASCHEK, 2015; SILVA et al., 2018) e outros.

Diante desta vantagem operacional, é fundamental que os imageadores termais sejam constantemente avaliados para o bom desempenho do sistema (CHRZANOWSKI, 2010). Em geral, as informações técnicas disponibilizadas pelos fabricantes sobre o desempenho das câmeras são muito limitadas. Por essa razão, segundo Silva, N. (2018), a caracterização dos equipamentos que compõem o sistema óptico termal é essencial para o planejamento adequado de atividades, possibilitando a obtenção de resultados precisos e fiéis à realidade.

No caso do monitoramento de corpos hídricos, sistemas sensores termais são capazes de quantificar e espacializar padrões de temperatura da superfície da água em rios, córregos e várzeas nas mais diversas escalas, que variam desde

um único canal às bacias hidrográficas inteiras (HANDCOOK et al., 2012; MENESES, 2012; OLIVEIRA, 2017; GHOLIZADEH et al., 2016). As aplicações do sensoriamento remoto termal para o monitoramento da temperatura da água são diversas e têm sido empregadas em diversos ambientes fluviais.

Antonelli et al. (2017) investigaram o potencial de câmeras infravermelho termais no monitoramento da dinâmica da mistura da água em pequenas escalas a partir da comparação dos fluxos inferidos pelo sensor TIR e àqueles observados em campo. Segundo os autores, a câmera pode melhorar a visualização da estrutura e da dinâmica do fluxo na confluência de pequenos rios, bem como fornecer informações sobre a como a morfologia e a descarga podem influenciar a mistura da água em riachos.

Em corpos hídricos menores, a resolução espacial de sensores a bordo de satélites pode ser insuficiente para o monitoramento da temperatura. Assim, o sensoriamento remoto termal aéreo é o mais indicado para observar os processos de transferência de calor desejados. Torgersen et al. (2001) comprovaram que, quando acoplados a um helicóptero, os sistemas sensores termais são capazes de adquirir valores de temperatura com boa precisão (no caso,  $\pm 0,5$  °C).

Apesar destas vantagens, muitas vezes, sensores termais acoplados a aeronaves ou outras plataformas aéreas, não são largamente disponíveis ao público, já que tais missões envolvem um custo relativamente alto, bem como dificuldades na calibração e interpretação correta da imagem ou dado adquirido (JENSEN, 2007; OLIVEIRA, 2017). Com o avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas, esse cenário vem sendo alterado, a partir do aumento do uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) em missões militares e em aplicações civis de Sensoriamento Remoto.

Em comparação com a detecção remota pelas plataformas aéreas tradicionais, o uso de VANTs permite obter imagens aéreas com relativo baixo custo, altíssima resolução espacial e com uma grande flexibilidade operacional (SILVA et al., 2015; ROIG et al., 2013; KUENZER; DECH, 2013; OLIVEIRA, 2017). Culbertson et al. (2013) utilizaram um VANT de asa fixa para identificar onze



anomalias térmicas no rio Meduxnekeag, na cidade de Houlton no Canadá, que foram associadas às zonas de descarga de águas subterrâneas, águas residuais tratadas e também águas provenientes do escoamento superficial na região. Eschabch et al. (2016) avaliaram o potencial de uma câmera infravermelho termal a bordo de VANT para o monitoramento de trocas de água superficiais e subterrâneas em alguns canais do rio Reno.

Existem algumas limitações relacionadas ao uso de VANTs na medição precisa da temperatura cinética da superfície da água, tais como: a necessidade de uma grande quantidade de imagens para compor uma área; dificuldade de sobreposição; possibilidade de distorções geométricas significativas; instabilidade da plataforma aérea em condições ambientais e climáticas adversas, dentre outras (LUZ, 2015; OLIVEIRA, 2017; KUENZER; DECH, 2013).

Por isso, segundo Oliveira (2017), o desafio é obter informações de qualidade e com maior precisão possível considerando os recursos disponíveis. Dessa forma, é indispensável o conhecimento detalhado sobre o sistema sensor termal e da plataforma utilizada para que o resultado do imageamento termal possa ser eficiente e preciso, possibilitando a identificação e análise dos padrões espaciais da temperatura da água em córregos, rios e planícies de inundações.

Baseado no exposto, o objetivo deste trabalho é avaliar a aplicabilidade e o desempenho do uso de sistema sensor termal, desenvolvido para a integração em plataformas não tripuladas, na estimativa de temperatura de superfície da água em uma seção do rio Paraíba do Sul, no município de Jacareí através de análises radiométricas, espectrais e espaciais. A hipótese do trabalho é que a caracterização do sistema sensor permite a aquisição de dados mais confiáveis, essenciais o monitoramento da temperatura da água, bem como identificar as mudanças de temperatura na presença de efluentes industriais e domésticos.

De forma mais específica, o trabalho tem os seguintes objetivos:

- Realizar a calibração do sistema sensor da câmera FLIR Duo.
- Executar o levantamento aéreo através de um sensor que opera no infravermelho termal embarcado em um VANT.

- Testar métodos de registro automático de imagens para o processamento dos dados termais coletados por VANT.
- Gerar um mosaico das imagens termais.
- Estimar as temperaturas cinéticas de superfície da água.
- Identificar mudanças de temperatura ao longo dos perfis longitudinal e transversal da seção imageada do rio Paraíba do Sul.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

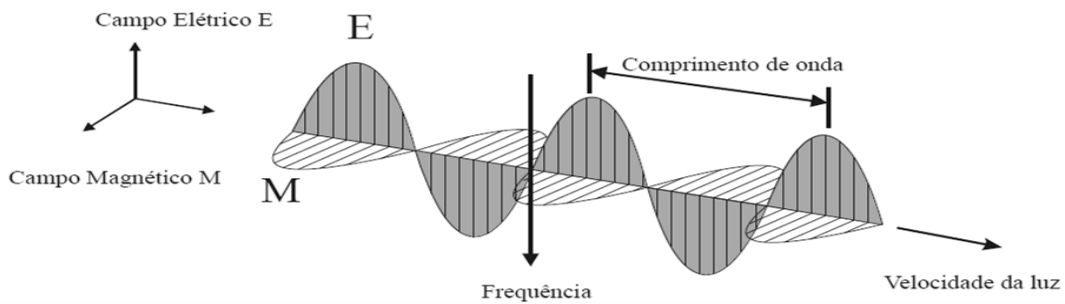
Neste capítulo, é apresentada uma revisão sucinta da literatura para a conceituação e definição dos temas relacionados ao escopo do trabalho. Os fundamentos teóricos permeiam o conhecimento acerca: da radiação eletromagnética no infravermelho termal; dos sistemas eletro-ópticos; das limitações de operação da câmera termal; do processamento de imagens termais bem como da análise e monitoramento da temperatura superficial da água e suas aplicações.

### **2.1 Radiação eletromagnética no infravermelho termal**

A radiação eletromagnética é uma forma dinâmica de energia que se manifesta a partir de sua interação com a matéria. Assim, diferentemente dos processos de condução e convecção, a energia eletromagnética se desloca no espaço por meio de ondas eletromagnéticas que não necessitam de um meio físico para serem transportadas, na forma de radiação (NOVO, 2010; GREGORIO-HETEM; JATENCO-PEREIRA, 2010).

A onda eletromagnética pode ser definida como a oscilação do campo elétrico (E) e magnético (M) resultante da vibração de uma carga elétrica e é caracterizada pela sinuosidade entre dois pontos definidos, sendo que a distância horizontal entre elas é denominada comprimento de onda ( $\lambda$ ) e o número de vezes que as ondas passam por um ponto no espaço em um determinado intervalo de tempo corresponde à frequência da onda ( $\nu$ ), conforme mostra a Figura 2.1 (NOVO, 2010; MENESES, 2012).

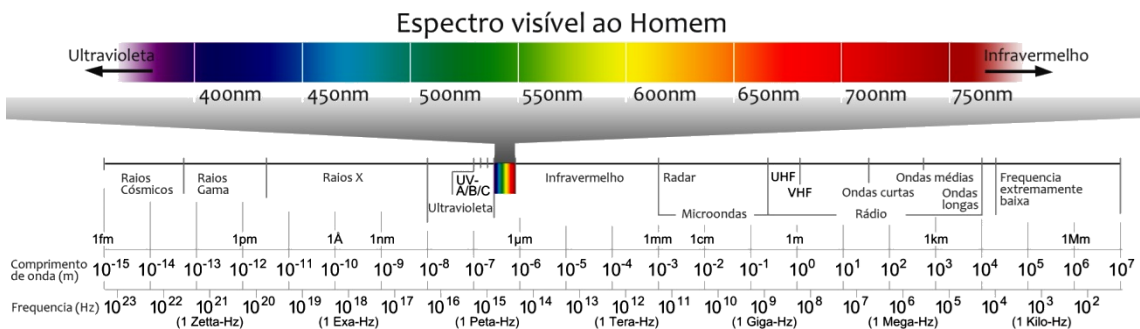
Figura 2.1 - Direção de propagação da radiação eletromagnética na forma de onda, em função das oscilações dos campos magnético (M) e elétrico (E).



Fonte: Meneses (2012).

Cada comprimento de onda possui uma determinada energia e frequência. A ordenação dessas diferentes energias eletromagnéticas, desde os raios gama até as ondas de rádio, em função do comprimento de onda e da frequência é denominada espectro eletromagnético (Figura 2.2). Ele foi dividido em faixas (bandas) de acordo com as diferentes propriedades da energia, ou seja, de acordo com o tipo de processo físico que origina a energia eletromagnética, o tipo de interação que ocorre entre a radiação e o objeto no qual ela incide e a transparência atmosférica em relação à radiação eletromagnética (MORAES, 2002; MOREIRA, 2011; MENESES, 2012).

Figura 2.2 - Espectro eletromagnético.



Fonte: Oliveira (2017).

No espectro eletromagnético, há uma faixa compreendida entre os comprimentos de onda 0,70  $\mu\text{m}$  e 1,00 mm, denominada infravermelho. A radiação infravermelha (IV) pode ser dividida em três faixas espectrais: IV próximo, IV médio e IV distante (frequentemente denominada de IV termal).

Embora não haja consenso, a radiação eletromagnética termal pode ser compreendida pelo conjunto de radiações eletromagnéticas cujos comprimentos variam de 3 a 1.000  $\mu\text{m}$ . Nessa porção do infravermelho termal, a energia envolvida é derivada de vibrações moleculares decorrentes da temperatura dos corpos. Por isso, qualquer corpo que possua temperatura acima do zero absoluto ( $0^\circ\text{K}$  ou  $-273^\circ\text{C}$ ) emite radiação eletromagnética (OLIVEIRA, 2017; KUENZER; DECH, 2013).

### 2.1.1 Emissividade

Para explicar o fenômeno da emissão de radiação foi criado um modelo hipotético denominado Corpo Negro (CN). Ele é definido como um radiador ideal que possui a propriedade de absorver e emitir toda a energia que nele incidir, independentemente do comprimento de onda e da direção da radiação (MOREIRA, 2011).

Entretanto, poucas superfícies terrestres agem como um Corpo Negro. Ao invés disso, a maioria dos corpos são seletivamente radiantes, ou seja, emitem apenas uma parte da radiação eletromagnética que seria emitida por um Corpo Negro à mesma temperatura. Este fato leva em conta o Coeficiente de Emissividade (JENSEN, 2007).

A Emissividade ( $\epsilon$ ) é a razão entre a radiância emitida por um Corpo Real seletivamente radiante e por um Corpo Negro à mesma temperatura cinética, conforme descrito por:

$$\epsilon = \frac{M_r}{M_b} \quad (2.1)$$

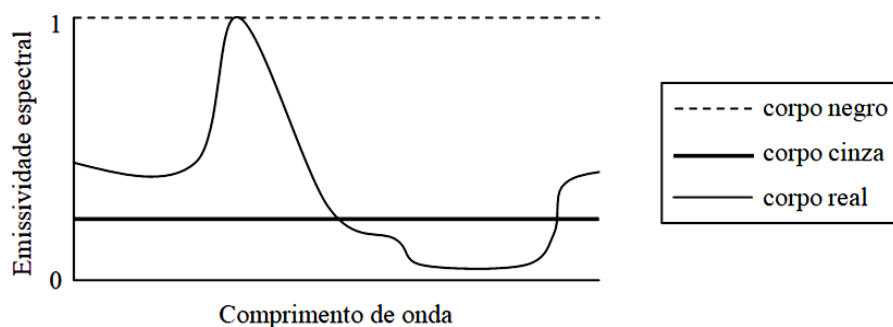
Onde:  $\epsilon$  = Emissividade [adimensional];  $M_r$  = Radiância total emitida por um corpo real [ $\text{W}/\text{m}^2$ ];  $M_b$  = Radiância total emitida por um corpo negro [ $\text{W}/\text{m}^2$ ].

Assim, os corpos terrestres podem ser classificados como Corpos Negros ( $\epsilon_n$ ), Corpos Cinza ( $\epsilon_c$ ) e Corpos reais ( $\epsilon_r$ ). Como já mencionado, o Corpo Negro absorve e emite toda a radiação que nele incide em função apenas de sua

temperatura cinética. Um Corpo Cinza emite radiação eletromagnética de maneira constante ao longo de todo o espectro e, por isso, possui uma emissividade constante sempre inferior a 1 ( $\epsilon_c < 1$ ). Já um Corpo Real é seletivamente radiante e possui uma emissividade que varia entre 0 e 1 ( $0 < \epsilon_r \leq 1$ ) dependendo do comprimento de onda considerado (JENSEN, 2007).

A Figura 2.3 ilustra a emissividade de um Corpo Negro, um Corpo Cinza e um Corpo Real hipotético ao longo do espectro eletromagnético.

Figura 2.3 - Emissividade espectral de um Corpo Negro, um Corpo Cinza e um Corpo Real hipotético.



Fonte: Adaptado de Jensen (2007).

Alguns materiais terrestres possuem emissividade próxima a 1, como, por exemplo, a água destilada com emissividade de 0,99 ao longo dos comprimentos de onda 8-14  $\mu\text{m}$ . Enquanto outros materiais possuem baixa emissividade, como o alumínio e o aço inoxidável, com  $\epsilon$  de 0,08 e 0,16 respectivamente. Essa diferença de emissividade entre os corpos é devida a diversos fatores como: cor, composição química, rugosidade da superfície, comprimento de onda, campo de visada e outros, não dependendo, no entanto da temperatura de superfície do material (JENSEN, 2007; MENESES, 2012; KUENZER; DECH, 2013).

### 2.1.2 Temperatura cinética e temperatura radiante

A energia das partículas moleculares em movimentos de um corpo é denominada temperatura cinética. Portanto, esta temperatura, também conhecida como temperatura real, é uma manifestação interna da energia das

moléculas que constituem um corpo. Sua medida é realizada posicionando um instrumento de medição, como o termômetro, em contato físico direto com o corpo do qual se deseja obter a temperatura (MENESES, 2012; LILLESAND; KIEFER, 1994).

Além dessa manifestação interna, um corpo emite energia em função de sua temperatura. Essa energia emitida é uma manifestação externa do estado da energia de um objeto e é utilizada para determinar a temperatura radiante (ou temperatura aparente) de uma superfície terrestre, através de sua detecção remota (LILLESAND; KIEFER, 1994; JENSEN, 2007).

Segundo Jensen (2007), para a maioria dos objetos terrestres, exceto aqueles compostos de vidro e metal, existe uma alta correlação positiva entre a temperatura cinética e a temperatura radiante do mesmo. Dessa forma, conhecendo a emissividade dos corpos terrestres, os sensores do infravermelho termal registram a intensidade da radiação eletromagnética emitida pelos mesmos que equivale à temperatura radiante aparente, na expectativa que haja uma boa correlação com a verdadeira temperatura do objeto (MENESES, 2012; OLIVEIRA, 2017).

### 2.1.3 Leis físicas da radiação termal

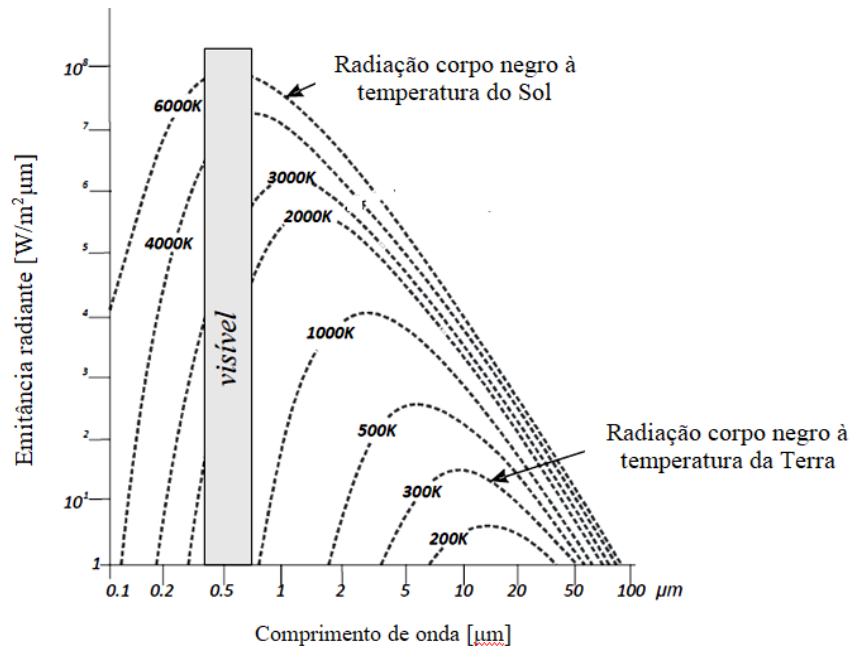
A Lei de Planck (Equação 2.2) descreve a quantidade máxima de intensidade radiante emitida por um Corpo Negro em um determinado comprimento de onda, em função de sua temperatura de superfície.

$$M_{\lambda} = \frac{2 \pi h c^2}{\lambda^5 (e^{h c / \lambda k T} - 1)} \quad (2.2)$$

Onde:  $M_{\lambda}$  = Radiância espectral emitida [ $W/m^2 \mu m$ ];  $h$  = Constante de Planck [ $6,626 \times 10^{-34} J s$ ];  $c$  = Velocidade da luz [ $2,9979246 \times 10^8 m/s$ ];  $k$  = Constante de Stefan-Boltzman [ $1,3806 \times 10^{-23} J/K$ ];  $T$  = Temperatura termodinâmica absoluta [K]; e  $\lambda$  = comprimento de onda [ $\mu m$ ].

Assim, resolvendo a Lei de Planck é possível obter as curvas de distribuição de energia emitida por um corpo a uma dada temperatura de superfície (Figura 2.4).

Figura 2.4 - Curva de distribuição das intensidades de energia radiante emitidas por fontes de radiação com diferentes temperaturas.



Fonte: Meneses (2012).

A energia radiante total de um Corpo Negro, ou seja, a radiação eletromagnética emitida, integrada para todo o espectro e todo o hemisfério, por um Corpo Negro em função de sua temperatura, pode ser descrita pela Lei de Stefan-Boltzmann (Equação 2.3).

$$M_b = \sigma T_B^4 \quad (2.3)$$

Onde:  $M_b$  = Radiância total emitida [ $W/m^2$ ];  $\sigma$  = Constante de Stefan-Boltzmann [ $5,6697 \times 10^{-8} W/m^2 K$ ];  $T$  = Temperatura termodinâmica absoluta [K].

Nota-se que a radiância total emitida por um Corpo Negro não é linear e sim proporcional à quarta potência de sua temperatura termodinâmica. Assim, segundo essa lei, quanto maior a temperatura do Corpo Negro, maior será a quantidade total de radiação eletromagnética emitida pelo mesmo. Por essa razão, a Terra, que apresenta uma temperatura média de  $300^\circ K$ , é considerada



uma fonte de radiação eletromagnética muito menos intensa que o Sol, cuja temperatura se aproxima de 6000° K (KUENZER; DECH, 2013).

O comprimento de onda de máxima emitância depende da temperatura de um Corpo Negro e pode ser descrita pela Lei de Wien (Equação 2.4).

$$\lambda_{\max} = \frac{k}{T} \quad (2.4)$$

Onde:  $\lambda_{\max}$  = Comprimento de onda de máxima emitância [ $\mu\text{m}$ ];  $k$  = Constante de Wien [2897,8  $\mu\text{m K}$ ];  $T$  = Temperatura termodinâmica absoluta [K].

Entre as várias curvas de emitância espectral, representadas na Figura 2.4, aquela que apresenta uma distribuição da energia, a temperatura de 6000° K é a que mais se aproxima da curva de emitância espectral do Sol, tendo o pico de máxima emitância entre os comprimentos de onda da região espectral do visível. Por outro lado, a curva de emitância radiante de uma fonte a temperatura de 300° K, que é compatível com aquela da superfície terrestre, tem seu pico de máxima emissão de radiação eletromagnética situado no infravermelho termal, especificamente, próximo ao comprimento de onda 9,6  $\mu\text{m}$ . Assim, é possível perceber que conforme a temperatura do corpo aumenta, a máxima intensidade de emissão de radiação eletromagnética desloca-se para comprimentos de onda cada vez menores (MENESES, 2012; KUENZER; DECH, 2013).

Por fim, a Lei de Kirchoff introduz a emissividade na predição da temperatura cinética dos objetos terrestres a partir da utilização do princípio de conservação da energia que permite explicar a interação do mesmo com o fluxo radiante incidente (OLIVEIRA, 2017).

Dessa forma, o fluxo radiante refletido ( $\phi_r$ ) e o fluxo radiante absorvido ( $\phi_\alpha$ ) pela superfície de interesse e o fluxo radiante transmitido ( $\phi_t$ ) pela mesma superfície podem ser mensurados através da aplicação do princípio de conservação da energia, observando o que acontece com toda a radiação eletromagnética que incide ( $\phi_i$ ) na superfície. A Equação 2.5, demonstra a interação do fluxo radiante espectral com uma superfície de interesse.

$$\phi_{i\lambda} = \phi_{r\lambda} + \phi_{\alpha\lambda} + \phi_{\tau\lambda} \quad (2.5)$$

Dividindo cada variável pelo fluxo radiante incidente, obtém-se:

$$\frac{\phi_{i\lambda}}{\phi_{i\lambda}} = \frac{\phi_{r\lambda}}{\phi_{i\lambda}} + \frac{\phi_{\alpha\lambda}}{\phi_{i\lambda}} + \frac{\phi_{\tau\lambda}}{\phi_{i\lambda}} \quad (2.6)$$

Então, a Equação 2.5 pode ser reescrita como:

$$1 = \rho_{\lambda} + \alpha_{\lambda} + \tau_{\lambda} \quad (2.7)$$

Onde:  $\rho_{\lambda}$  = Reflectância espectral da superfície de interesse;  $\alpha_{\lambda}$  = Absortância espectral;  $\tau_{\lambda}$  = Transmitância espectral.

De acordo com a Lei de Kirchoff, na região do infravermelho termal do espectro eletromagnético a emissividade de um corpo normalmente equivale a absortância do mesmo a um determinado comprimento de onda:

$$\varepsilon_{\lambda} = \alpha_{\lambda} \quad (2.8)$$

Levando em conta a conservação de energia, as Equações 2.5 e 2.8 têm:

$$1 = \rho_{\lambda} + \varepsilon_{\lambda} + \tau_{\lambda} \quad (2.9)$$

Como a maioria dos objetos na superfície terrestre são opacos à radiação infravermelha termal, ou seja, o fluxo radiante transmitido nesses comprimentos de onda é extremamente pequeno, podendo, portanto, ser desconsiderado. Assim sendo, a Equação 2.9 pode ser reformulada como:

$$1 = \rho_{\lambda} + \varepsilon_{\lambda} \quad (2.10)$$

Essa relação permite afirmar que um material sendo bom emissor em um determinado comprimento de onda é necessariamente um bom absorvedor e um pobre refletor. Isso quer dizer que enquanto materiais com alta emissividade absorvem grandes quantidades de energia incidente e emitem grandes quantidades de energia, materiais com baixa emissividade absorvem e emitem menores quantidades de energia (MOREIRA, 2011; KUENZER; DECH, 2013).

Assim, conhecendo a emissividade de um objeto terrestre, essa lei permite ajustar a Lei de Stefan-Boltzmann, originalmente utilizada para Corpos Negros (Equação 2.3), para obter a radiação eletromagnética emitida por um Corpo Real pela equação:

$$M_r = \varepsilon \sigma T_R^4 \quad (2.11)$$

Para o sensoriamento remoto termal, no qual se obtém normalmente a temperatura radiante ( $T_B$ ) do objeto de interesse, essa lei tem muita utilidade para determinar a temperatura cinética ( $T_R$ ) a partir de sua temperatura aparente. Para tanto assume-se:

$$\sigma T_B^4 = \varepsilon \sigma T_R^4 \quad (2.12)$$

Portanto, a temperatura radiante de um objeto está relacionada à sua temperatura cinética e a emissividade pela equação:

$$T_B = \varepsilon^{1/4} T_R \quad (2.13)$$

Onde:  $T_B$  = Temperatura radiante ou temperatura aparente; e  $T_R$  = Temperatura cinética ou temperatura real.

Através dessa relação é possível perceber que a temperatura aparente de um material será sempre menor do que sua temperatura real, sendo que essa diferença será maior quanto menor for a emissividade do material. Segundo Andrade (2011), para a estimativa da emissividade de uma superfície é preciso considerar que o comportamento espectral da mesma está relacionado à sua composição física, rugosidade, mistura de elementos no mesmo pixel de uma imagem, entre outros.

Nas últimas décadas diversos métodos foram desenvolvidos e estudados com o objetivo de estimar a emissividade e a temperatura da superfície através da radiância emitida pelos alvos terrestres, tendo como desafio comum a necessidade de separar as informações de temperatura e emissividade (GRONDONA; ROLIM 2016). Independentemente do número de bandas espectrais utilizadas para a aquisição de valores de radiância, sempre o número

de incógnitas ( $N+1$ ) será maior do que as variáveis medidas (GILLESPIE et al., 1998; ANDRADE, 2011). Como exemplifica Grondona e Rolim (2016), um radiômetro de  $N$  bandas espectrais possui  $N$  medidas de radiância,  $N$  emissividades para cada banda e uma temperatura  $T$ . Então, para determinar estes parâmetros, é necessário estabelecer algum vínculo entre eles a partir de um conjunto de hipóteses e condições para que o resultado obtido seja confiável.

Os principais métodos de estimativa da emissividade de uma superfície, baseando-se em imagens termais, são: Método de Duas Temperaturas; Razão Espectral (RE); *Normalized Emissivity Method (NEM)*; *Temperatur/Emissivity Separation Method (TES)*; Índice Espectral Independente da Temperatura (TISI); Método de Banda de Referência (MBR); *Emissivity Normalization Method (NOR)*; Método do Corpo Cinza (MCC); entre outros.

Diversos pesquisadores, como Li et al. (1999), Sobrino et al. (2002), Andrade (2011) e Grodona e Rolim (2016) buscaram avaliar e comparar estes diferentes métodos. Entretanto, apesar dos métodos serem aplicáveis em várias situações, eles podem produzir estimativa errônea da temperatura e emissividade devido a sua simplificação, ruído ou erro de calibração do sistema sensor utilizado o que pode interferir na precisão do resultado final.

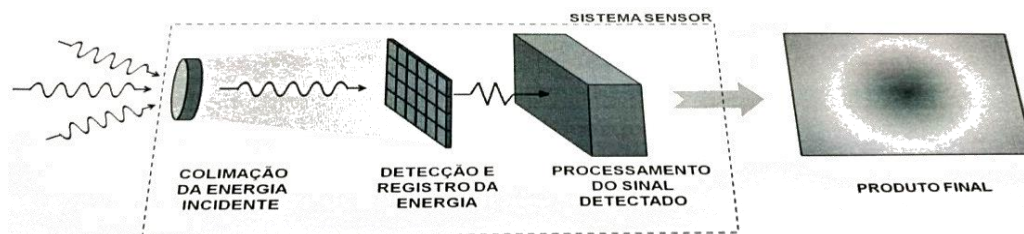
## **2.2 Sistemas sensores termais**

Sensores são sistemas capazes de transformar a radiação eletromagnética refletida, emitida ou transmitida pelos alvos da superfície terrestre, em determinada faixa espectral, em uma imagem ou sinal passível de ser associado à suas propriedades físicas, químicas, biológicas ou geométricas (STEFFEN et al., 1981; GALO et al., 2002). Um sistema sensor no infravermelho termal é um dispositivo semelhante àqueles que operam em outras faixas do espectro eletromagnético. Porém, o sinal a ser detectado pelo sensor é relativamente mais fraco, já que ele coleta, detecta e traduz a radiação infravermelha termal emitida pelos alvos terrestres (NOVO, 2010).

De maneira simplificada, o sensor é composto por três subsistemas: coletor, que recebe a energia incidente sobre o sensor; filtro, que seleciona a faixa espectral

da energia a ser medida; detector, que detecta e registra essa energia; processador, que transforma o sinal detectado em um dado passível de ser transmitido, gravado ou transformado em um produto que possa ser analisado (Figura 2.5) (MORAES, 2002; OLIVEIRA, 2017).

Figura 2.5 - Componentes de um sistema sensor eletro-óptico.



Fonte: Oliveira (2017).

A unidade coletora é constituída basicamente de um dispositivo óptico, que tem como função coletar e colimar a radiação emitida por um alvo de interesse dentro do campo de visão (FOV - *field of view*). O dispositivo óptico compõe-se de: um prisma giratório de faces espelhadas, que promove a varredura da superfície terrestre; de um conjunto de espelhos, e um telescópio, que colimam e focalizam a radiação eletromagnética sobre o detector (LUCCA; BASTOS, 2001).

Nos sistemas sensores térmicos, são utilizados detectores quânticos ou térmicos. Os detectores quânticos baseiam-se no efeito fotoelétrico que ocorre em seu interior, onde os elétrons são liberados entre duas camadas de um dispositivo semicondutor, elaborado a partir do telureto de mercúrio e cádmio (HgCdTe). Esse dispositivo que opera entre os comprimentos de onda 8 e 14  $\mu\text{m}$  é muito sensível ( $\pm 0,01^\circ \text{K}$ ) e rápido, porém necessita de um sistema de resfriamento externo (KUENZER; DECH, 2013; LUCCA; BASTOS, 2001).

A incidência da radiação eletromagnética tende a aumentar a temperatura do detector de tal modo que o ruído passa a interferir no sinal proveniente do objeto. Por isso, os detectores necessitam de um sistema de refrigeração de ciclo fechado, baseado em nitrogênio líquido ou hélio, a fim de manter a temperatura dos elementos entre  $30^\circ$  e  $77^\circ \text{K}$  durante a operação e, assim, melhorar a razão sinal-ruído (RSR) (NOVO, 2010).

Já os detectores térmicos utilizam o efeito de mudança da temperatura sobre as propriedades elétricas do elemento detector, que pode ser medido e transformado em valores de intensidade. Esses detectores são menos sensíveis e mais lentos que os detectores quânticos, entretanto não precisam de nenhum elemento de resfriamento e, por isso, são menos dispendiosos (KUENZER; DECH, 2013). Dentre este grupo de detectores, destacam-se os de microbolômetros de silício e os de óxido de vanádio (VOx) (SILVA, R. 2018).

O processador é composto por um circuito elétrico que efetua a amplificação, filtragem e ordenamento do sinal e fornece pulsos de sincronismo, de modo a possibilitar um sinal compatível com as unidades de gravação e visualização da imagem (LUCCA; BASTOS, 2001). Esse processo é denominado amostragem e tem como principal objetivo discretizar em níveis digitais (ND) a intensidade do sinal de cada pixel do detector (SILVA, R. 2018).

Dessa forma, é possível estabelecer uma relação entre a temperatura e a radiação eletromagnética sentida pelo sistema sensor. Esse valor é utilizado para converter a radiância em temperatura aparente e, posteriormente, em temperatura cinética a partir do conhecimento das propriedades de emissividade dos objetos terrestres (NOVO, 2010).

Todos os sensores, independentemente da faixa espectral em que operam, são caracterizados por alguns elementos básicos que atuam em conjunto, indicando suas limitações. As características intrínsecas destes sistemas expressam suas capacidades radiométricas, espectrais e espaciais, permitindo conhecer os reais limites de sua operação (NOVO, 2010; OLIVEIRA, 2017).

### **2.2.1 Resolução espectral**

Resolução espectral é uma medida de quantidade e dimensão (largura) dos intervalos de comprimentos de onda específicos no espectro eletromagnético, denominados de bandas ou faixas, às quais um sistema sensor é sensível (JENSEN, 2007). Para maximizar a análise das interações entre a radiação eletromagnética e os objetos que compõem a superfície terrestre, é necessário que o sensor apresente mais bandas espectrais com intervalos de comprimentos

de onda estreitos que lhe permite registrar sutis variações no comportamento espectral do alvo (NOVO, 2010).

Normalmente, a capacidade espectral de um sistema sensor é conhecida a partir de sua Função de Resposta Espectral (FRE) que descreve a sensibilidade do equipamento no reconhecimento de diferentes comprimentos de onda de radiação (SILVA, N. 2018). Para sua determinação, é possível utilizar os métodos de caracterização direta, que envolve o conhecimento preciso dos parâmetros de atenuação atmosférica e de geometria de iluminação do objeto imageado, ou de caracterização indireta, que compreende a utilização da resposta espectral de um detector de referência calibrado.

Senso assim, o sinal medido pelo sensor pode ser expresso por:

$$S_{sen}(\lambda) = M(\lambda, T)\varepsilon(\lambda, T)FRE_{mono}(\lambda)\tau_{atm}(H, T_{amb}, P_{amb}, C_g, d, \lambda)FRE_{sen}(\lambda)fator_{geo} \quad (2.14)$$

Enquanto a resposta do sensor de referência é:

$$\begin{aligned} S_{ref}(\lambda) \\ = M(\lambda, T)\varepsilon(\lambda, T)FRE_{mono}(\lambda)\tau_{atm}(H, T_{amb}, P_{amb}, C_g, d, \lambda)FRE_{ref}(\lambda)fator_{geo}FRE_{filtro}(\lambda) \end{aligned} \quad (2.15)$$

Onde:  $S_{sen}(\lambda)$  e  $S_{ref}(\lambda)$  é o sinal medido pelo sensor a ser caracterizado e pelo sensor de referência, respectivamente;  $M(\lambda, T)$  é a exitância e  $\varepsilon(\lambda, T)$  a emissividade da fonte infravermelho, em que ambos dependem do comprimento de onda ( $\lambda$ ) e da temperatura termodinâmica (T);  $FRE_{mono}(\lambda)$  é a função resposta espectral do monocromador;  $\tau_{atm}$  indica a transmitância atmosférica em função da umidade relativa do ar ( $H$ ), da temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), da pressão atmosférica ( $P_{amb}$ ), da concentração de gases na atmosfera ( $C_g$ ), da distância  $d$  percorrida pela radiação no comprimento de onda  $\lambda$ ;  $FRE_{sen}(\lambda)$  e  $FRE_{ref}(\lambda)$  correspondem respectivamente às funções resposta espectral do sensor analisado e do sensor referência;  $fator_{geo}$  é um fator geométrico; e  $FRE_{filtro}(\lambda)$  indica a função resposta de um filtro que pode ser utilizado.

Considerando que as medições da câmera e do sensor de referência tenham sido realizadas utilizando os mesmos equipamentos (fonte, monocromador, etc.), no mesmo dia e com a menor diferença de tempo possível entre elas,

evitando que as condições experimentais não se alterem significativamente. Então:

$$FRE_{sensor}(\lambda) = \frac{S_{sensor}(\lambda)}{S_{ref}(\lambda)} FRE_{ref}(\lambda) \cdot FRE_{filtro}(\lambda) \quad (2.16)$$

### 2.2.2 Resolução radiométrica

A resolução radiométrica de um sistema sensor pode ser definida como a capacidade de seus detectores em distinguir as diferenças na potência do sinal ao registrarem o fluxo radiante refletido, emitido ou retroespalhado pela superfície do alvo (JENSEN, 2007).

Este fluxo radiante apresenta diferença de intensidades contínuas que são detectadas, registradas e quantizadas durante o processo de conversão analógico para digital em bits. Quanto menor a diferença entre sinais detectados, maior a resolução radiométrica de um sensor (NOVO, 2010; JENSEN, 2007). Por exemplo, um sistema de 14 bits, como é o caso da câmera infravermelho termal FLIR Duo, pode representar o nível de radiação que incide sobre ele em  $2^{14}$  (16.384) níveis digitais (ND).

Matematicamente, no caso de sistemas sensores termais, a radiância do corpo negro que chega até a câmera pode ser obtida através da equação de Planck para todos os comprimentos de onda sensibilizados levando-se em conta a FRE do sensor:

$$L_{sensor} = \int_{\lambda_{inicial}}^{\lambda_{final}} \frac{M(\lambda, T_{CN})}{\pi} \varepsilon_{CN}(\lambda, T_{CN}) FRE_{sensor}(\lambda) \tau_{atm}(H, T_{amb}, P_{amb}, C_{gases}, d, \lambda) d\lambda \quad (2.17)$$

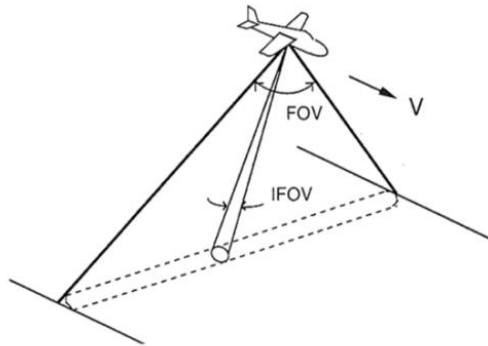
Onde:  $L_{sensor}$  é a radiância proveniente do corpo negro que é lida pelo sensor;  $M(\lambda, T_{CN})$  é a exitância da fonte infravermelha, que depende do comprimento de onda ( $\lambda$ ) e da temperatura termodinâmica do corpo negro ( $T_{CN}$ ); e  $\varepsilon_{CN}(\lambda, T_{CN})$  representa a emissividade do corpo negro.



### 2.2.3 Resolução espacial

A menor feição passível de detecção pelo sistema sensor depende de sua resolução espacial que pode ser definida como uma medida da menor separação angular ou linear entre dois objetos terrestres (NOVO, 2010). Nesse caso, dois elementos são importantes para a caracterização geométrica de um sensor: o campo de visada (*Field of View* – FOV) e o campo de visada instantâneo (*Instantaneous Field of View* – IFOV) (Figura 2.6).

Figura 2.6 - Conceito de FOV e IFOV.



Fonte: Adaptado de Novo (2010).

Como o conceito de IFOV está relacionado às propriedades do sensor, ou seja, à dimensão dos detectores e à distância focal do sistema óptico, a maioria dos sistemas sensores utilizam ópticas que possuem um campo de visada instantâneo (IFOV) constante. Ele pode ser calculado como (SILVA, R. 2018):

$$IFOV = \frac{FOV}{n_{pixel}} \quad (2.18)$$

Onde: FOV é o campo de visada do sensor, em radianos, obtido do manual do fabricante; e  $n_{pixel}$  é o número de pixels identificados horizontalmente pela câmera.

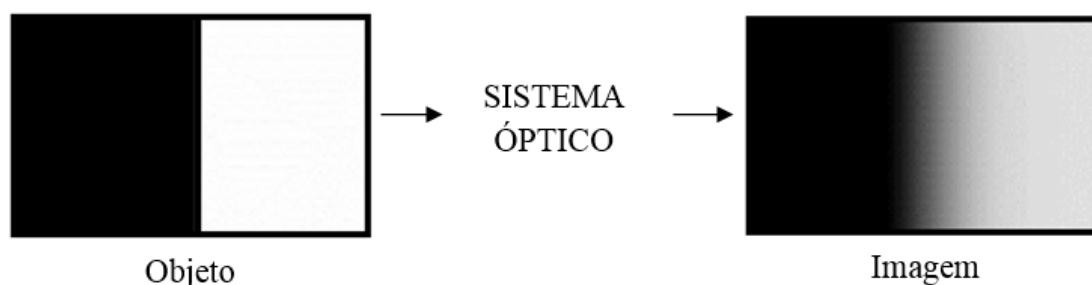
A frequência de *Nyquist*, também calculada em função do FOV do sensor (Equação 2.19), pode ser definida como a taxa mínima de amostragem para que uma imagem possa ser reconstruída (BOREMAN, 2001).

$$f_N = \frac{n_{pixel}}{2FOV} \quad (2.19)$$

Atualmente, a caracterização dos limites espaciais da operação de uma câmera é realizada através do cálculo da *Modulation Transfer Function* (MTF), considerada por Barbarini (2012) um dos meios mais úteis para caracterizar o desempenho óptico de um sistema de formação de imagens. Esta função é a resposta da magnitude do sistema óptico à ondas senoidais de diferentes frequências espaciais que permite avaliar a capacidade de um detector em reproduzir um sinal cuja distribuição varia senoidalmente (BOREMAN, 2001; SILVA, R. 2018).

Geralmente a caracterização espacial avalia a modulação da resposta da câmera, isto é, a diferença entre o ND máximo e mínimo de uma imagem, em transições entre uma temperatura mais alta e outra mais baixa (Figura 2.7).

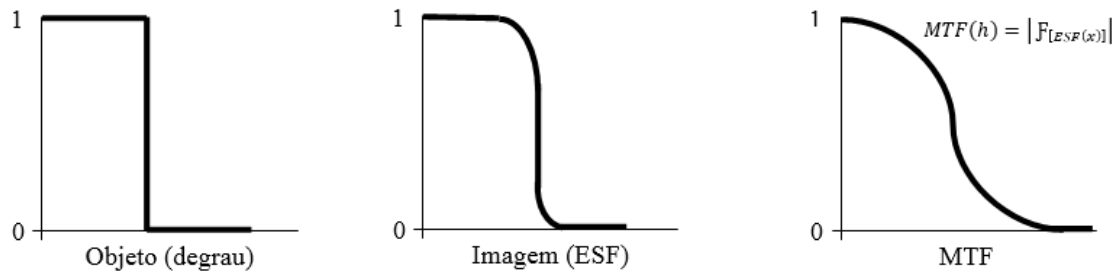
Figura 2.7 - Conceito de resolução espacial para um sensor eletro-óptico, em que a transição da temperatura é representada por tons de cinza (alta/claro e baixa/escuro).



Fonte: Adaptado de Silva, R. (2010).

A matriz de ND resultante não discretiza um objeto com transição em degrau perfeita devido às aberrações do sistema óptico e aos efeitos de difração, mas através de uma função de espalhamento de borda (*Edge Spread Function- ESF*). Matematicamente, a MTF pode ser obtida pela Transformada de Fourier da ESF (VOELZ, 2011). Na Figura 2.8, é apresentada a relação entre ESF e MTF.

Figura 2.8 - Relação ESF e MTF.



Fonte: Adaptado de Silva, R. (2010).

Segundo Silva, R. (2018), a MTF pode ser traduzida em:

- Para frequências espaciais pequenas, os pares de linha (diferença claro/escuro) são muito bem identificados e, por isso, os elementos distintos são bem detectados;
- Para frequências espaciais grandes, os pares de linha não apresentam bom contraste ou nitidez e, conseqüentemente, os objetos não podem ser mais observados separadamente.

### 2.3 Fotogrametria com VANT

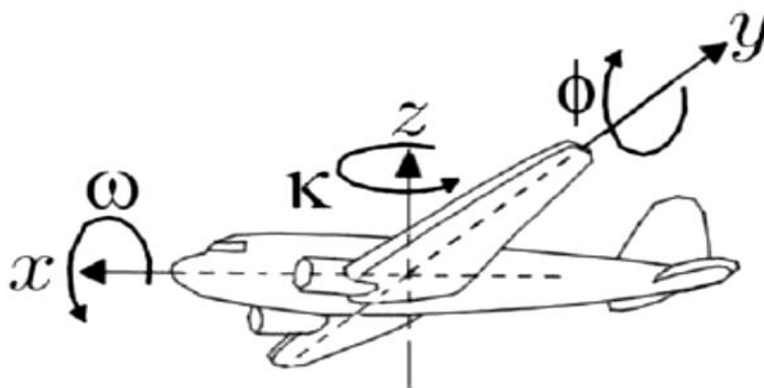
De acordo com a Sociedade Americana de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto (ASPRS), fotogrametria é definida como a ciência de obtenção de informações confiáveis a partir de sistemas de imageamento ou outros sensores, sobre objetos físicos ou ambientes por meio de processos de gravação, medição, interpretação e representação de imagens fotográficas (BARBOSA; PEREIRA, 2017).

A fotogrametria utiliza imagens de objetos para o cálculo de suas posições e volumes na superfície terrestre ou no espaço extraterrestre. Por meio da fotogrametria são determinados o posicionamento e a forma do objeto fotografado. Para que isso seja possível, é necessário o conhecimento sobre parâmetros de orientação interior e exterior das imagens, determinados por métodos de calibração de câmeras e de foto-triangulação, respectivamente (COELHO, 2015).

Os parâmetros de orientação interior são inerentes ao sistema óptico e sensor da câmera, como a distância focal do conjunto de lentes, os parâmetros de distorção radial e descentrada e a posição da coordenada central relativamente às marcas fiduciais (ZANETTI, 2017; FERREIRA, 2014). Assim, o processo de orientação interior consiste na recuperação da posição da fotografia em relação à câmera, ou seja, trata-se da recuperação geométrica dos feixes perspectivos que formou a fotografia, a priori afetados pelos parâmetros citados acima (ANDRADE, 1998; COELHO, 2015).

Os parâmetros de orientação exterior são determinados pela posição espacial e pela orientação angular do centro de perspectiva referente ao solo no momento de captura da fotografia. Estes parâmetros, conforme representação na Figura 2.9, estão ligados à trajetória do voo e aos movimentos da plataforma aérea durante a aquisição da fotografia. O procedimento de orientação exterior permite a recuperação da posição e altitude de cada imagem, segundo um determinado referencial (normalmente o objeto de interesse). Dessa forma, uma imagem está orientada exteriormente se as coordenadas do centro de exposição ( $x, y$  e  $z$ ) e os ângulos de rotação ou de altitude do sensor ( $\omega, \phi$  e  $\kappa$ ) são conhecidos (ZANETTI, 2017; COELHO, 2015).

Figura 2.9 - Parâmetros de orientação exterior de um sensor fotogramétrico a bordo de uma plataforma aérea.



Fonte: Brito; Coelho (2007).

A fotogrametria é uma técnica em constante evolução de instrumentos e de avanços tecnológicos. Atualmente, com o avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas, vem crescendo o uso de veículos aéreos não tripulados – VANTs para a aerofotogrametria seja ela para aplicações civis e/ou militares.

VANT é todo e qualquer tipo de veículo aéreo que não necessita de um operador humano a bordo e que se utiliza de forças aerodinâmicas para se elevar, podendo voar automaticamente ou ser pilotado remotamente (DOD, 2003). Outro termo que também tem sido aplicado para se referir a aeromodelos é o drone, sendo que esses veículos aéreos apresentam, normalmente, um emprego maior da robótica e maior autonomia na operação (LONGHITANO, 2010).

Sua ampla utilização pode ser explicada, principalmente, por sua capacidade de obter imagens aéreas, com relativo baixo custo, altíssima resolução espacial e uma flexibilidade operacional incomparável (resoluções, escalas e tipos de sensores, que são adaptados às necessidades de cada projeto) (SILVA et al., 2015; ROIG et al., 2013; KUENZER; DECH, 2013).

Entretanto, existem algumas limitações relacionadas ao uso de VANTs para a obtenção de fotografias aéreas, como (LUZ, 2015; OLIVEIRA, 2017): necessidade de maior quantidade de imagens para compor uma mesma área; distorções geométricas significativas; dificuldade de superposição; variação de controle sobre as fotografias, devido ao pouco conhecimento a respeito da posição e orientação no momento de cada fotografia; não verticalidade da câmera; instabilidade da plataforma aérea sob condições ambientais e climáticas adversas; carga útil muito limitada, dentre outras. Essas limitações exigem o desenvolvimento e aperfeiçoamento tanto dos sistemas sensores quanto das plataformas não tripuladas que vêm sendo empregadas.

Atualmente, a navegação autônoma desses veículos é realizada utilizando (OLIVEIRA, 2017; ALMEIDA, 2014):

- sistema sensor, que captura imagens aéreas;

- sistema receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) que fornece informações de posicionamento para cada imagem coletada (eixos  $x, y$  e  $z$ ), permitindo que a rota pré-estabelecida seja realizada;
- dispositivo eletrônico, denominado de Unidade de Medição Inercial (UMI), que fornece os ângulos de rotação e de atitude do sensor ( $\omega$ ,  $\phi$  e  $\kappa$ ) de cada imagem capturada através do uso de giroscópios, acelerômetros, barômetros e bússola;
- controlador de voo, que gerencia os demais.

Zanetti (2017) avaliou a influência da distribuição e do número de pontos de controle para a geração de ortofotos a partir dos dados da câmara RGB a bordo de VANT. Para isso, foram realizadas quatro abordagens no processamento das imagens: aquisição de 5, 10 e 15 pontos de controle em campo, distribuídos em toda área de estudo, e coleta de 15 pontos de controle agrupados em uma única região da área estudada. De um modo geral, as ortofotos geradas com 15 pontos de controle bem distribuídos e agrupados apresentaram, respectivamente, a melhor e pior precisão. Diante disso, a melhor solução para a obtenção de um produto confiável foi utilizar pontos de controle e verificar a sua distribuição espacial.

O estudo realizado por Oliveira (2017) avaliou a exatidão posicional dos produtos resultantes do uso de dois sensores termais, sendo um a bordo de um VANT. Na faixa espectral na qual foram adquiridos os dados termais, há uma baixa relação sinal ruído (RSR). Como resultado, a autora observou que a utilização de pontos de controle aumenta a exatidão planimétrica e altimétrica do ortomosaico gerado, demonstrando ser uma alternativa eficaz para o imageamento de áreas com características não aparentes na faixa do visível.

Oliveira (2017) ainda salienta que além de essas plataformas se destacarem devido à simplicidade mecânica e às facilidades de execução do voo, diversos *softwares* foram desenvolvidos para o processamento de imagens de VANTs. A automação destes *softwares*, normalmente, é muito maior em relação aos *softwares* clássicos de fotogrametria, devido a utilização de algoritmos mais

completos que permitem o processamento de muitas imagens em um curto intervalo de tempo.

Em geral, o processamento fotogramétrico automático consiste na entrada das imagens capturadas e nas suas coordenadas centrais para a obtenção dos parâmetros de orientação interior e exterior, foto-triangulação, retificação, reamostragem e geração do MDT, resultando no ortomosaico (OLIVEIRA, 2017).

A primeira etapa a ser executada, denominada alinhamento da imagem ou registro da imagem, consiste em um processo de sobreposição de imagens adquiridas sequencialmente de uma mesma região ou da mesma cena através de uma transformação geométrica onde as coordenadas de uma imagem são relacionadas às coordenadas de outra imagem de referência (ALVES JR. et al., 2014; GERKE, 2017; HENRIQUES et al., 2015; NISHITANI, 2015; RODRIGUES, 2016).

Devido às características dos sistemas sensores termiais, que geram imagens com baixa resolução espacial e sem feições bem definidas (WEBER et al., 2015), os métodos de detecção dos pontos homólogos presentes nos *softwares* fotogramétricos automáticos disponíveis não permitem uma perfeita sobreposição entre um par de imagens (RODRIGUES, 2016). A associação incorreta dos pontos homólogos prejudica a qualidade final dos produtos gerados. Dessa forma, a escolha de uma técnica de registro apropriada é fundamental para o processamento de imagens termiais obtidas a bordo de VANT.

Resumidamente, o processo de registro de uma imagem é realizado em quatro etapas (GOSHTASBY, 2005; GONZALEZ; WOODS, 2006; RODRIGUES, 2016; NISHITANI, 2015; MONTANARI, 2015):

- i. Identificação de características: são identificados com o auxílio de um detector, pontos ou regiões representativas de uma imagem, como bordas, texturas, intersecção de linhas, variação de cores ou outra informação que possa ser extraída da imagem.

- ii. Casamento de características: as coordenadas, em pixel (linhas e colunas), das características são estabelecidas em ambas imagens analisadas.
- iii. Transformação espacial: é estimada a função de transformação, considerando as informações sobre as distorções causadas pelos movimentos de translação, rotação, escalonamento e inclinação, provendo o casamento das características.
- iv. Por fim, a transformação e sobreposição das imagens: é efetuada uma reamostragem utilizando a função de transformação para mapear as posições dos pixels das imagens para novas posições de um mesmo sistema de coordenadas.

Diferentes técnicas podem ser empregadas para a realização desta etapa de registro das imagens aéreas, principalmente quando a identificação de características de forma automática é prejudicada devido a homogeneidade da imagem, como é o caso das imagens termiais.

Weber et al. (2015) utilizaram o método de fusão de imagens, visível de maior resolução e termal, obtidas simultaneamente por câmeras acopladas a uma VANT, para melhorar a resolução espacial da imagem TIR bruta. Isso facilitou a identificação de características nas imagens e, conseqüentemente, seu registro. Assim foi possível realizar um processamento automático das imagens aéreas a partir da técnica *Structure from Motion* (SfM). Os resultados mostraram que utilizar uma banda pancromática obtida da imagem RGB resolve o problema relacionado à dificuldade de identificação de características em imagens termiais, permitindo a utilização de técnicas de processamento automático para gerar um ortomosaico preciso das imagens aéreas.

Outro algoritmo para a identificação de características que pode ser utilizado no processamento das imagens termiais, principalmente quando combinada com imagens do espectro visível, é o SIFT (*Scale Invariant Feature Transform*), descrito por Lowe (1999). Este algoritmo é composto por um detector, baseado na diferença de Gaussianas, e um descritor que tem por objetivo identificar características em imagens aéreas que sejam invariantes à escala e rotação e



praticamente invariantes à luminosidade e transformações afins (NISHITANI, 2015).

O algoritmo SIFT é executado em cinco etapas principais: construção do espaço de escala, detecção de extremos, localização de pontos-chave, atribuição de orientação e definição de descritores aos pontos-chaves (GONZÁLES, 2010; GHOSH; KAABOUCH, 2013). Inicialmente, o espaço escala de uma imagem,  $L(x,y,\sigma)$ , é obtido a partir da convolução de uma Gaussiana de escala variável,  $G(x,y,\sigma)$ , com uma imagem  $I(x,y)$  (LOWE, 2004):

$$L(x, y, \sigma) = G(x, y, \sigma) * I(x, y) \quad (2.20)$$

Onde: \* é o operador de convolução;  $x$  e  $y$  são as coordenadas do centro do quadro;  $\sigma$  é a escala aplicada na imagem; e  $G$  é a função Gaussiana, definida como:

$$G(x, y, \sigma) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-x^2+y^2/2\sigma^2} \quad (2.21)$$

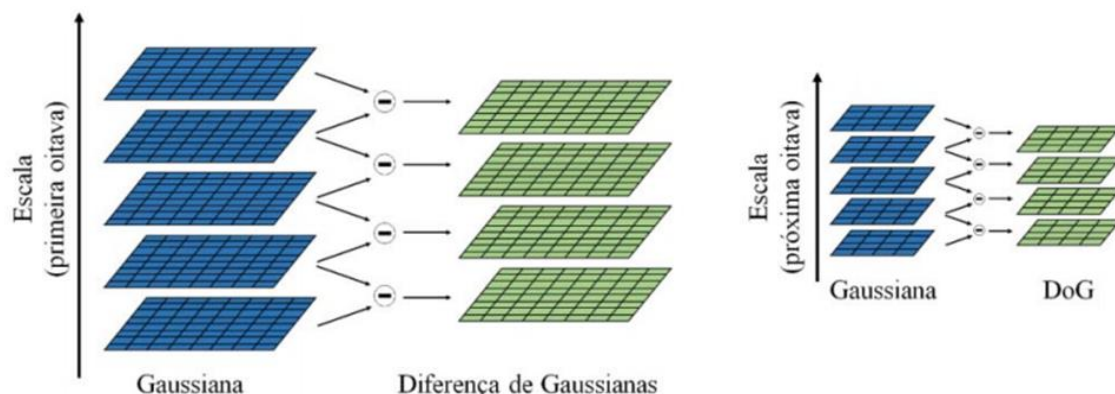
A detecção de pontos-chave, então é possível com a utilização de uma função DoG (*Difference of Gaussian*), obtida pela diferença de duas imagens filtradas em escalas próximas:

$$D(x, y, \sigma) = [G(x, y, k\sigma) - G(x, y, \sigma)] * I(x, y) \quad (2.22)$$

$$D(x, y, \sigma) = L(x, y, k\sigma) - L(x, y, \sigma) \quad (2.23)$$

Onde:  $k$  é o fator constante de separação entre o espaço de escalas. Cada oitava no espaço escala é dividida em números inteiro  $s$  de intervalos, onde  $k = 2^{1/s}$ . Assim, conforme mostra a Figura 2.10, a cada oitava são produzidas  $(s + 3)$  imagens, a fim de obter  $(s + 2)$  DoGs. A quantidade de oitavas depende da dimensão da imagem atual e os redimensionamentos ocorrem até a dimensão mínima de aproximadamente 4x4 pixels (TARALLO, 2013).

Figura 2.10 - Representação gráfica do procedimento de obtenção das DoGs para diferentes oitavas de uma imagem.

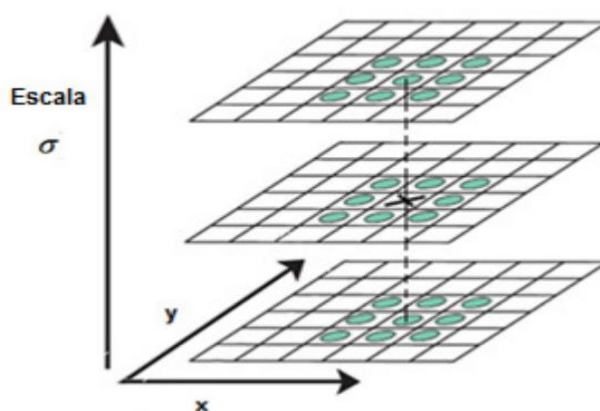


Fonte: Coelho et al. (2017).

Em seguida, após a suavização das imagens por meio da utilização da função Gaussiana, os detalhes indesejados e ruídos são eliminados e as principais características são realçadas. Dessa forma, é possível detectar variações de intensidade na imagem e, conseqüentemente, os pontos-chave.

Para isso é feita uma comparação pixel a pixel de uma DoG a fim de detectar os pontos que se destacam em relação a seus vizinhos, os chamados máximos e mínimos da imagem. Esta etapa consiste em comparar um pixel com seus oito vizinhos de mesma escala, com os nove pontos vizinhos na escala superior e os nove na escala inferior, representados na Figura 2.11.

Figura 2.11 - Detecção de um ponto extremo, máximo e mínimo, quando comparado aos seus vizinhos no espaço-escala.



Fonte: Gonzáles (2010).

Todos os pontos detectados com extremos (máximos e mínimos) são possíveis candidatos a pontos chaves e, por isso, é executado um ajuste detalhado do fator escala, localização e orientação do ponto de amostragem em relação a seus vizinhos. Esse ajuste permite eliminar pontos-chave de baixo contraste (sensíveis ao ruído) ou localizados na borda da imagem. A Figura 2.12 exemplifica a seleção de pontos chave em uma imagem de baixa resolução.

Figura 2.12 - Exemplo de seleção de pontos chaves em uma imagem, onde eles são representados por vetores que fornecem informações sobre a localização, magnitude e orientação.



Fonte: Lowe (2004).

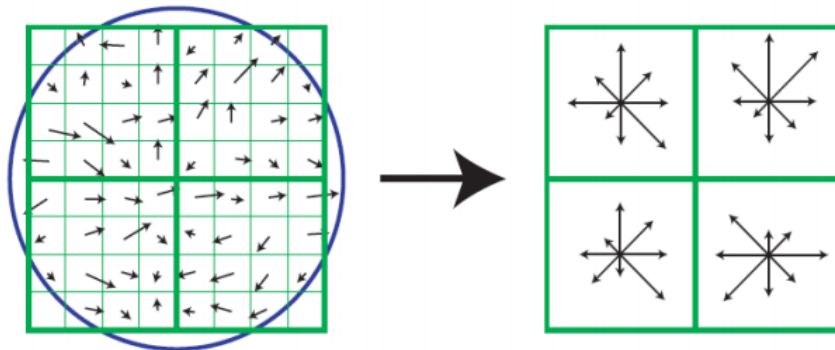
Como observado na Figura 2.12, são atribuídas a cada ponto chave na imagem  $L(x, y, \sigma)$  a orientação,  $\theta(x, y)$ , e a magnitude,  $M(x, y)$ , a partir da diferença de *pixels* (LOWE, 2004):

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \left[ \frac{L(x, y + 1) - L(x, y - 1)}{L(x + 1, y) - L(x - 1, y)} \right] \quad (2.24)$$

$$M(x, y) = \sqrt{[L(x + 1, y) - L(x - 1, y)]^2 + [L(x, y + 1) - L(x, y - 1)]^2} \quad (2.25)$$

Um conjunto de histogramas de orientação é montado com as orientações dos *pixels* que se encontram em uma região ao redor de cada ponto chave (TARALLO, 2013; GONZÁLES, 2010). O descritor do ponto-chave é então determinado computando as magnitudes e orientações que são obtidas no entorno do ponto-chave, como mostra a Figura 2.13. Dessa forma, o descritor consiste de um vetor que contém os valores do histograma, caso o histograma tenha 8 valores de orientação, o vetor característico resultante possui 128 características para cada ponto chave.

Figura 2.13 - Exemplo de construção do descritor do ponto-chave.



Fonte: Lowe (2004).

Para cada imagem são construídos diversos descritores, cada um referente a um determinado ponto-chave (TARALLO, 2013). Assim obtém-se um conjunto de descritores que podem ser utilizados para encontrar correspondência entre duas imagens de acordo com os pontos chaves detectados, como mostra a Figura 2.14.

Figura 2.14 - Exemplo de correspondência entre imagens ao utilizar o algoritmo detector SIFT.



Fonte: Lowe (2004).

Castro et al. (2009) utilizaram o algoritmo SIFT para avaliar o impacto de alguns métodos de pré-processamento em imagens aéreas capturadas por uma câmera acoplada a um helicóptero na região metropolitana de São José dos Campos. Os autores obtiveram como resultado que a aplicação de alguns filtros, como o filtro da mediana, aumentou a porcentagem de acerto do detector na identificação de características. A combinação destes métodos diminui o impacto de algumas variações comuns em imagens, como a rotação, translação e escala, tornando a sua aplicação ideal quando são utilizadas imagens de diferentes sensores.

Durante a identificação de características, apesar da consistência do detector SIFT, podem ocorrer falsas correspondências entre as características de duas imagens. Um dos algoritmos mais utilizados para tratar estes erros de correspondência, também conhecidos como *outliers*, é o RANSAC (*Random Sample Consensus*). Este algoritmo, proposto por Fischler e Bolles (1981), encontra os valores dos parâmetros de um modelo para um conjunto de dados

conhecido e identifica quais elementos deste conjunto se desviam do padrão (NISHITANI, 2015).

Lima (2018) utilizou o algoritmo SURF (*Speeded Up Robust Features*) para identificar a posição de pontos homólogos em 39 fotografias obtidas por uma câmera embarcada em um VANT. Dessas, apenas 9 imagens tiveram a sua identificação correta, enquanto nas demais pelo menos um ponto foi erroneamente relacionado. Quando o algoritmo SURF foi utilizado em conjunto com o RANSAC, em apenas seis imagens não foi possível estimar a posição dos pontos-chave, pois as fotografias eram oblíquas. Apesar dessa melhora, alguns pontos homólogos ainda podem ser identificados erroneamente, mesmo que visualmente esses erros sejam pequenos.

Os algoritmos baseados em detector de característica são adequados para a geração de mosaico de imagens de alta resolução sob uma variedade de alterações, como rotação e escala (ALMEIDA, 2018). Porém, a utilização deste método exige um tempo de processamento e custo mais elevado do que quando utilizado em *software* de fotogrametria semiautomático (GOSH; KAABOUCH, 2016).

#### **2.4 Análise e monitoramento de temperatura da água**

A temperatura da água é provavelmente o parâmetro que apresenta maior influência sobre a vida e os sistemas aquáticos, já que afeta diretamente as reações químicas características de cada espécie e conseqüentemente intervém na taxa de crescimento, distribuição e desenvolvimento dos organismos aquáticos (CAISSIE, 2006; FANTIN-CRUZ et al., 2010; HANDCOCK et al., 2012). Entretanto, na maioria dos córregos e rios, a temperatura da água é medida em estações de qualidade da água distribuídas de maneira não uniforme ao longo de todo o corpo hídrico, obtendo-se informações limitadas quanto à distribuição espacial da temperatura de sua superfície (FRICKE; BASCHEK, 2015).

O sensoriamento remoto termal vem sendo cada vez mais utilizado para a obtenção da temperatura da superfície da água, necessária para estudos biológicos e programas de monitoramento em grandes escalas. Isso porque pode fornecer resultados relativamente viáveis economicamente, com um bom nível de confiabilidade, bem como recobrimento espacial e temporal adequados às demandas ambientais, possibilitando a identificação e análise dos padrões espaciais da temperatura da água em córregos, rios e planícies de inundações (FAUX et al., 2001; GHOLIZADEH et al., 2016; HANDCOCK et al., 2012).

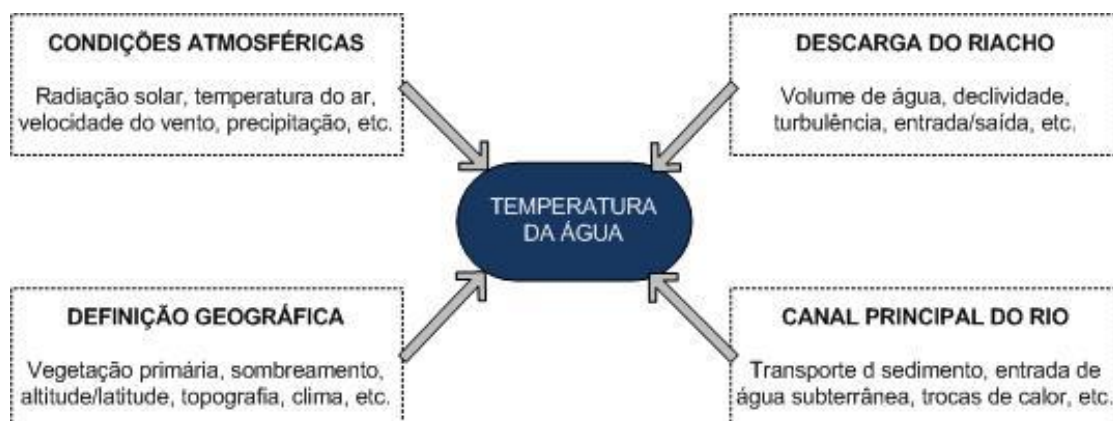
Por outro lado, a obtenção de imagens termais (TIR) pode ser dispendiosa e complexa, já que depende das condições climáticas, disponibilidade de plataformas (orbitais, aéreas ou terrestres) e conhecimento técnico para a coleta dos dados. Além disso, algumas correções radiométricas, geométricas e espaciais são necessárias para recuperar, com precisão, as medidas de temperatura da superfície da água, o que pode exigir tempo e esforço financeiro (NOVO, 2010; HANDCOCK et al., 2012).

Dessa forma, o sensoriamento remoto termal combinado com o monitoramento em campo representa uma metodologia de monitoramento equilibrado da temperatura da água e pode reduzir as limitações de acesso físico (FAUX et al., 2001).

#### **2.4.1 Fatores que influenciam a temperatura da água**

A variação de temperatura da água pode ocorrer naturalmente ou como resultado de perturbações antrópicas (Figura 2.9), que podem ser normalmente classificados em quatro grandes grupos: condições atmosféricas, definição geográfica, descarga de afluentes e leito do curso d'água (CAISSIE, 2006; FANTIN-CRUZ et al., 2010; FAUX et al., 2001).

Figura 2.15 - Os principais fatores naturais e antrópicas que influenciam o regime térmico em ambientes lóticos.



Fonte: Adaptado de Caissie (2006).

As condições atmosféricas são os fatores mais importantes, pois são os principais responsáveis pelos processos de troca de calor que ocorrem na superfície da água. Dentre eles, destaca-se a radiação solar, a temperatura do ar, a velocidade do vento e a precipitação, em forma de chuva ou neve (CAISSIE, 2006).

A temperatura do ar exerce uma influência direta sobre a temperatura da água e, simultaneamente com outros fatores, como a pressão de vapor d'água, determina a temperatura da água na qual a troca de calor com a atmosfera é efetuada (WALKER; LAWSON, 1977; FANTIN-CRUZ et al., 2010). Os rios menores e mais expostos à radiação solar, como os afluentes, podem apresentar maiores variações na temperatura da água do que o canal principal do rio, que normalmente é protegido da radiação solar por um dossel de vegetação (CAISSIE, 2006; FANTIN-CRUZ et al., 2010). Além disso, a velocidade do vento atua sobre a superfície d'água promovendo turbulência e redistribuição do calor, resultando na presença de camadas com diferentes densidades de água (FERREIRA; CUNHA, 2013; ANGELOCCI; VILA NOVA, 1995).

A definição geográfica é relevante devido a sua influência nas condições atmosféricas, na topografia, na cobertura vegetal e na forma do canal, que afetam o grau de exposição da água a sedimentos e radiação solar (CAISSIE, 2006; CARVALHO et al., 2000). Segundo Ward (1985), a altitude, latitude e continentalidade determinam as condições climáticas regionais e, por sua vez,



afetam o comportamento térmico do corpo hídrico. A altitude é um parâmetro que se destaca por exercer uma influência primária sobre o regime térmico das águas devido à interferência da temperatura do ar (FANTIN-CRUZ et al., 2010).

Já a vegetação, além do efeito direto da sombra sobre a temperatura da água, reduz a erosão no entorno do leito do rio e, conseqüentemente, diminui a concentração de sedimentos na água. Portanto, a alteração da mata ciliar, como o desmatamento, pode alterar as condições térmicas do corpo d'água, especialmente em pequenos riachos devido à sua pequena capacidade térmica. (MURRAY et al., 2000; RUTHERFORD et al., 1997).

O terceiro grupo de fatores é a descarga de afluentes, ou seja, as entradas e saídas de fluxo que influenciam na capacidade de aquecimento ou resfriamento do corpo hídrico através da mistura da massa de água (CASSIE, 2006). Com relação a esses parâmetros, as nascentes que alimentam os rios, recebem um grande afluxo das águas subterrâneas e por isso são caracterizadas por um alto grau de constância térmica. Ao mesmo tempo, a alteração de fluxo, através da descarga de afluentes e efluentes industriais, pode ser responsável por mudanças na temperatura da água (MOSLEY, 1983; SINOKRIOT; GULLIVER, 2000).

As características do canal principal do corpo hídrico também podem atuar sobre o regime termal do mesmo. Mosley (1983) observou que rios com meandros possuem uma temperatura muito mais elevada do que os outros devido a seus pequenos e estreitos canais que são expostos frequentemente às condições meteorológicas. Portanto, o regime térmico do rio é a somatória dos diferentes efeitos destes fatores ambientais e antrópicos que atuam sobre o mesmo. Por isso, qualquer alteração significativa desses aspectos que regem a temperatura da água irá modificar direta ou indiretamente as condições térmicas do corpo d'água (PERCEBON et al., 2005; FANTIN-CRUZ et al., 2010; FAUX et al., 2001).

#### **2.4.2 Variabilidade espaço-temporal da temperatura da água**

A variação espacial da temperatura da água, conforme mencionado anteriormente, ocorre principalmente em direção à jusante, já que os fluxos de

afluentes e de nascentes contribuem significativamente para as temperaturas do fluxo principal do rio (BOTTINO, 2008). Por isso, as flutuações na temperatura podem ser observadas próximo à confluência com os tributários, em áreas de nascentes e de piscinas de infiltração, sendo que essa alteração é maior em corpos de água menores (CAISSIE, 2006; EBERSOLE et al., 2001; FAUX et al., 2001).

Souza et al. (2016) avaliaram o comportamento térmico do reservatório São Pedro, no município de Juiz de Fora, MG, através de uma modelagem matemática com os dados meteorológicos e hidrológicos representando as forçantes e condições de contorno, respectivamente. As simulações indicaram que a contribuição dos afluentes determina o padrão de distribuição espaço-temporal da temperatura da água no reservatório. Esse fato pode ser justificado pelo pequeno tamanho do reservatório e as grandes vazões dos afluentes, fazendo com que a mistura e a distribuição das temperaturas da água ocorram de forma rápida.

Na escala temporal, as alterações na temperatura da água seguem dois ciclos: diários e sazonais. As variações diárias da temperatura da água tendem a atingir um mínimo no início da manhã, ao nascer do Sol, e um máximo no final da tarde, próximo ao pôr do Sol. Essa variabilidade pode ser explicada pela alta capacidade calorífica da água. Em largos e rasos, onde as correntes de água estão mais expostas às condições meteorológicas, as variações ao longo do dia na temperatura da superfície da água são ainda mais perceptíveis (ANGELOCCI; VILLA NOVA, 1995).

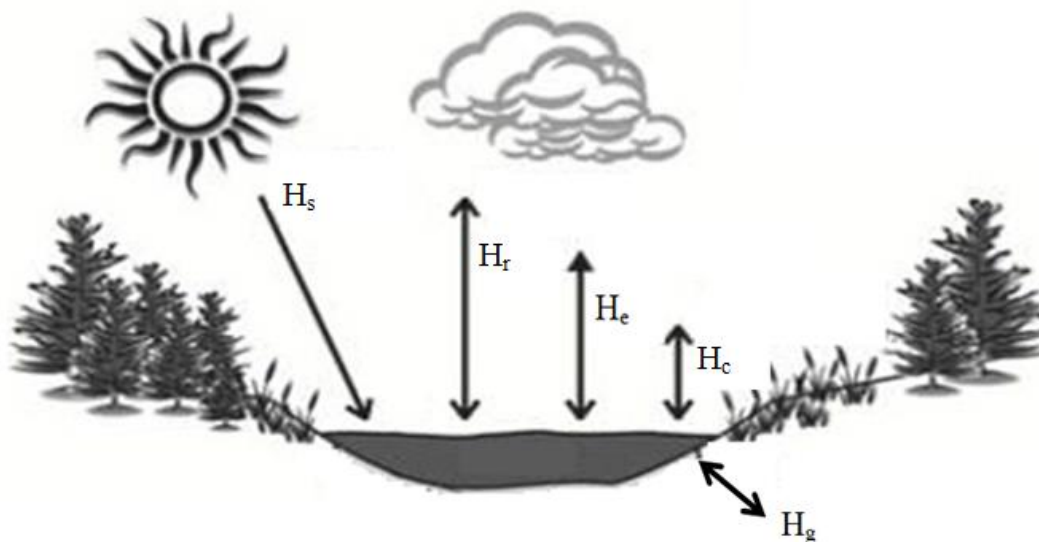
Associada a essa variabilidade diária, os corpos hídricos também apresentam um ciclo anual de temperatura seguindo uma função sinusoidal de acordo com as estações do ano. Alvarenga et al. (2012), ao estudarem a qualidade da água na microbacia do Ribeirão dos Macacos, afluente do rio Paraíba do Sul, identificaram que a menor temperatura da água foi encontrada no período de inverno, na estação seca, como esperado. Segundo Caissie (2006), em regiões mais frias, esse ciclo anual se estende desde a primavera até o outono, com temperatura próxima ao congelamento durante o inverno.

### 2.4.3 Processos de transferência de calor

O fluxo energético de um corpo hídrico é determinado pelo balanço das trocas de calor da superfície da água com o entorno, principalmente na interface ar/água e leito/água (HENDRICKS, 2010).

Como representado na Figura 2.10, o fluxo de calor entre a temperatura do ar e a temperatura da água ocorre através das seguintes interações: absorção da radiação solar ( $H_s$ ), emissão da radiação eletromagnética na região do infravermelho termal ( $H_r$ ), troca de calor latente pelos processos de evaporação e condensação ( $H_e$ ) e transferência de calor convectivo ( $H_c$ ) (CASSIE, 2006).

Figura 2.16 - Processos de transferência de calor entre a superfície da água e o ambiente ao entorno, nas interfaces ar/água e leito/água.



Fonte: Adaptado de Caissie (2006).

A radiação solar é o componente dominante do fluxo de energia total, seguido pela radiação eletromagnética de ondas longas e evaporação. A evaporação ainda é o componente mais significativo para a perda de calor. Por outro lado, a transferência de calor convectivo é o componente menos significativo para o fluxo e, por isso, pode ser desconsiderado (CAISSIE, 2006).

A troca de calor no leito do rio é função do aquecimento geotérmico que ocorre através dos processos de condução e advecção, ou seja, através do escoamento

do rio, da contribuição da água subterrânea e de trocas com a zona hiporreica (região de interação entre as águas superficiais e subterrâneas, Hg) (CAISSIE, 2006; ALEXANDER et al., 2003).

Nos grandes canais, onde o abrigo e a sombra da vegetação nativa é muito baixa, supõe-se que as trocas de calor na interface água/ar sejam dominantes em relação aos fluxos de calor no canal do rio, principalmente devido à alta entrada de radiação solar e exposição ao vento. Na medida em que a vegetação ripária se torna mais importante, como, por exemplo, nas nascentes, os fluxos de calor entre ar/água tendem a diminuir paralelamente ao aumento da importância das trocas de calor no leito do corpo d'água (CAISSIE, 2006).

### 3 ÁREA DE ESTUDO

O município de Jacareí localiza-se a sudoeste do estado de São Paulo (Figura 3.1), Região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte (RMVPLN), entre as coordenadas geográficas S 23°18'45" e W 45°56'15". Apresenta uma área aproximada de 465 km<sup>2</sup>, altitude média de 596 m, e aproximadamente 231.863 habitantes, segundo estimativa do IBGE (2010).

A região sofre influência das serras do Mar e da Mantiqueira que se distribuem em seu limite. As serras formam barreiras orográficas o que torna o clima na RMVPLN complexo, com intensa dinâmica climática (CASTRO, 2015). Jacareí possui clima tipo Cwa (Koeppen, 1948), subtropical de inverno seco e verão chuvoso. As temperaturas médias anuais encontram-se entre 21,8 e 23,0°C, enquanto a precipitação acumulada varia de 50 a 250 mm entre os meses de seca (agosto) e de chuva (dezembro e janeiro) (BRANDÃO, 2016; NEVES, 2016).

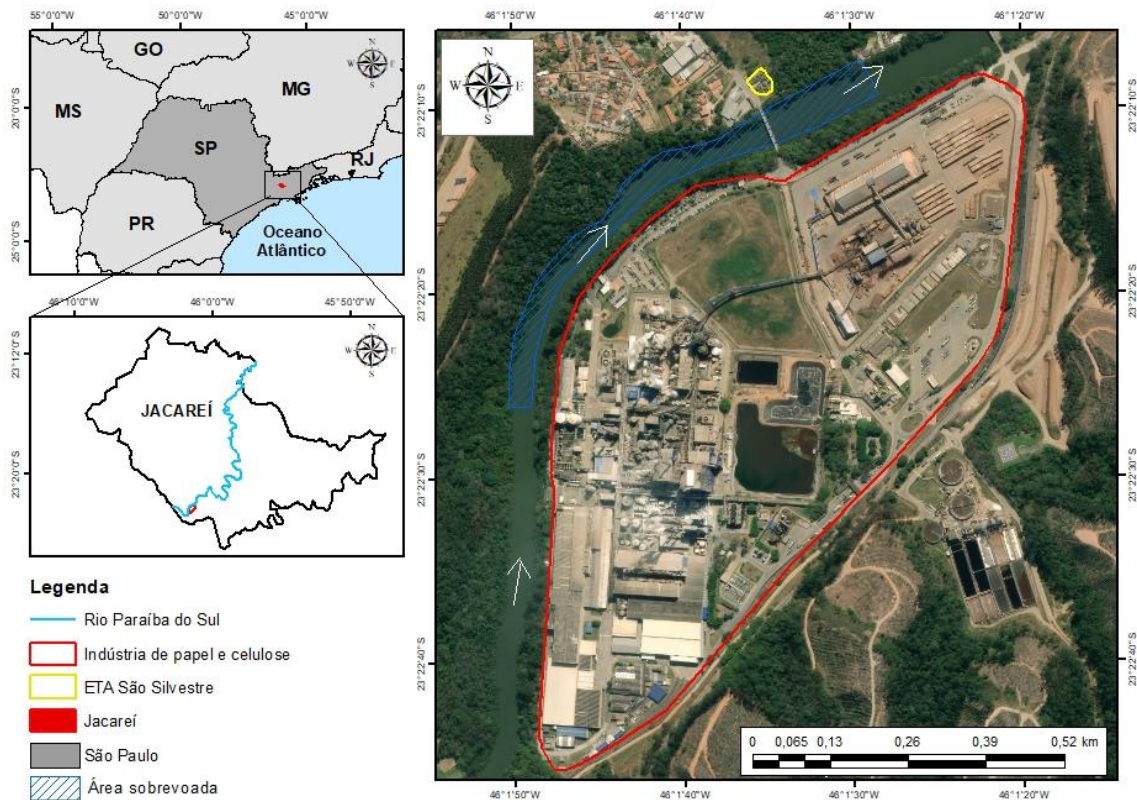
O rio Paraíba do Sul nasce na Serra da Bocaina, no Estado de São Paulo, pela confluência dos rios Paraitinga e Paraibuna, estendendo-se por 1.150 km, drenando também parte dos territórios de Minas Gerais e Rio de Janeiro. Na região de Jacareí, este rio apresenta um corpo lótico bastante sinuoso com meandros, percorrendo terrenos sedimentares de grandes várzeas (GONÇALVES, 2016; PRIANTI JR, 2009; CASADO et al., 2011),

O município conta com o Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAEE), órgão prestador de serviços de água e esgotos, atendendo 99% da população com abastecimento de água, em grande parte a partir das tomadas de água do rio Paraíba do Sul. Apresenta 95,1% de índice de atendimento quanto à coleta de esgoto e 71% de tratamento de efluentes sanitários, sendo que atualmente 40 bairros realizam lançamentos irregulares nos corpos hídricos, contaminando os rios e córregos e, conseqüentemente, colocando à saúde da população do entorno em risco (IBGE, 2008; SAAE, 2006; PRIANTI JR, 2009).

O intenso processo de industrialização observado em São Paulo, aliado à implantação da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), em Volta Redonda, e da Rodovia Presidente Dutra, levou a RMVPLN de uma condição de economia

rural para urbana em um curto período de tempo. Assim, a sua bacia apresenta uma diversidade de indústrias, segmentada em diversos setores, como a química, metalúrgica, de bebidas e alimentos, retirada de areia e produção de papel e celulose, sendo algumas de grande porte e com alto potencial poluente (DEVIDE, 2013). A presença de diversas indústrias na região traz problemas ao meio ambiente, sendo que em muitos casos afeta a qualidade de suas águas, inviabilizando seus usos em determinados períodos do ano, além das interferências econômicas, sociais e ambientais envolvidas (PRIANTI JR, 2009).

Figura 3.1 - Área do estudo no município de Jacareí/SP.



Fonte: Própria autora.

Grande parte da poluição da água no município se deve à presença de uma indústria de papel e celulose de grande porte, localizada à margem direita do rio, no Distrito de São Silvestre (Figura 3.1). A indústria faz captação de um grande volume de água para a produção de papel e em outros processos de produção. Além disso, efetua o lançamento de seus efluentes tratados no rio, à jusante da

captação de água de São Silvestre e à montante da captação de água da ETA Central de Jacareí (PRIANTI JR, 2009; CONSTANZI; DANIEL, 2002; HAMAGUCHI, 2007).





## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo sintetiza os materiais e os procedimentos metodológicos realizados em três diferentes etapas deste estudo: a caracterização do sensor eletro-óptico; o processamento das imagens termais obtidas com um VANT e a identificação e análise dos padrões espaciais da temperatura da superfície da água.

A caracterização da câmera foi realizada em laboratório com base nos procedimentos adotados por Lima Filho (2015), Oliveira (2017), Boreman (2001), Silva, R. (2018) e Silva, N. (2018). Utilizando os parâmetros obtidos nesta etapa, foi possível identificar as limitações operacionais do sistema sensor e, assim efetuar as correções na imagem termal a fim de garantir maior precisão na obtenção da temperatura.

Para o processamento das imagens aéreas obtidas por meio da câmera acoplada ao VANT, foi utilizado o algoritmo detector SIFT, em duas diferentes plataformas, para o registro automático das imagens: no *software* fotogramétrico semi automático *Agisoft*, e no *software MATLAB*, junto ao algoritmo RANSAC.

Por fim, a obtenção da temperatura de superfície da água e a identificação de fluxos com diferentes temperaturas foi realizada com base na metodologia adotada por Fricke; Bascheck (2015), Mallast et al. (2013) e Killick; Eckley (2014).

### 4.1 Materiais

Os materiais utilizados para a elaboração desta dissertação foram: a câmera FLIR Duo; os equipamentos de laboratório empregados nas caracterizações da câmera; e o Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) Matrice 600 Pro, todos de propriedade do Instituto de Estudos Avançados (IEAv).

#### 4.1.1 Câmera FLIR Duo

O sensor termal utilizado pertence à câmera de baixo custo FLIR Duo, desenvolvida pela FLIR Systems Inc., cuja descrição e especificações técnicas são apresentadas na Tabela 4.1 abaixo.

Tabela 4.1 - Especificações técnicas dos sensores da câmera FLIR Duo.

| <b>ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS DA CÂMERA FLIR DUO</b> |   |
|---|---|
| <b>Atributos Físicos</b>                          |   |
| Dimensões   | 41 x 59 x 29,6 mm                                     |
| Peso  | 84 gramas   |
| <b>Interface</b>                                  |   |
| Voltagem  | 5,0 - 26,0 VDC  |
| Controle Remoto                                   | Via aplicativo ( <i>smartphone</i> ou <i>tablet</i> ) |
| <b>Dados do Sistema Sensor Termal</b>             |   |
| Tipo de detector                                  | Microbolômetro de óxido de vanádio (VOx)              |
| Resolução espacial                                | 160 x 120 pixels                                      |
| Campo de visada (FOV)                             | 57° x 44°   |
| Frequência de frames                              | 7,5 Hz (NTSC); 8,3 Hz (PAL)                           |
| Resolução radiométrica                            | 14 bits   |
| Resolução espectral                               | 7,5 - 13,5 µm   |
| Faixa de temperatura                              | -20... +60 °C   |
| Exatidão  | ± 5 °C ou ± 5%  |
| <b>Dados do Sistema Sensor Visível</b>            |   |
| Resolução espacial                                | 1.920 x 1.080 pixels                                  |
| Campo de visada (FOV)                             | 90 °  |

Fonte: Adaptado de FLIR SYSTEMS (2017).

Como o próprio nome sugere, trata-se de uma câmera multi-sensor do tipo FLIR (*Forward Looking Infrared*) que possui atributos físicos específicos, como seu peso e dimensões, que permitem sua utilização em VANTs de pequeno porte. A câmera grava simultaneamente imagens termais (TIR) e na faixa do visível (RGB) em um cartão micro SD em diversos formatos de arquivos, sendo que cada um deles possui características diferentes no que diz respeito ao registro de dados radiométricos. O formato JPEG armazena imagem RGB comprimida,

enquanto o formato TIFF refere-se ao dado termal bruto de 14 bits, que permite registrar valores que variam entre - 20 e 60° C.

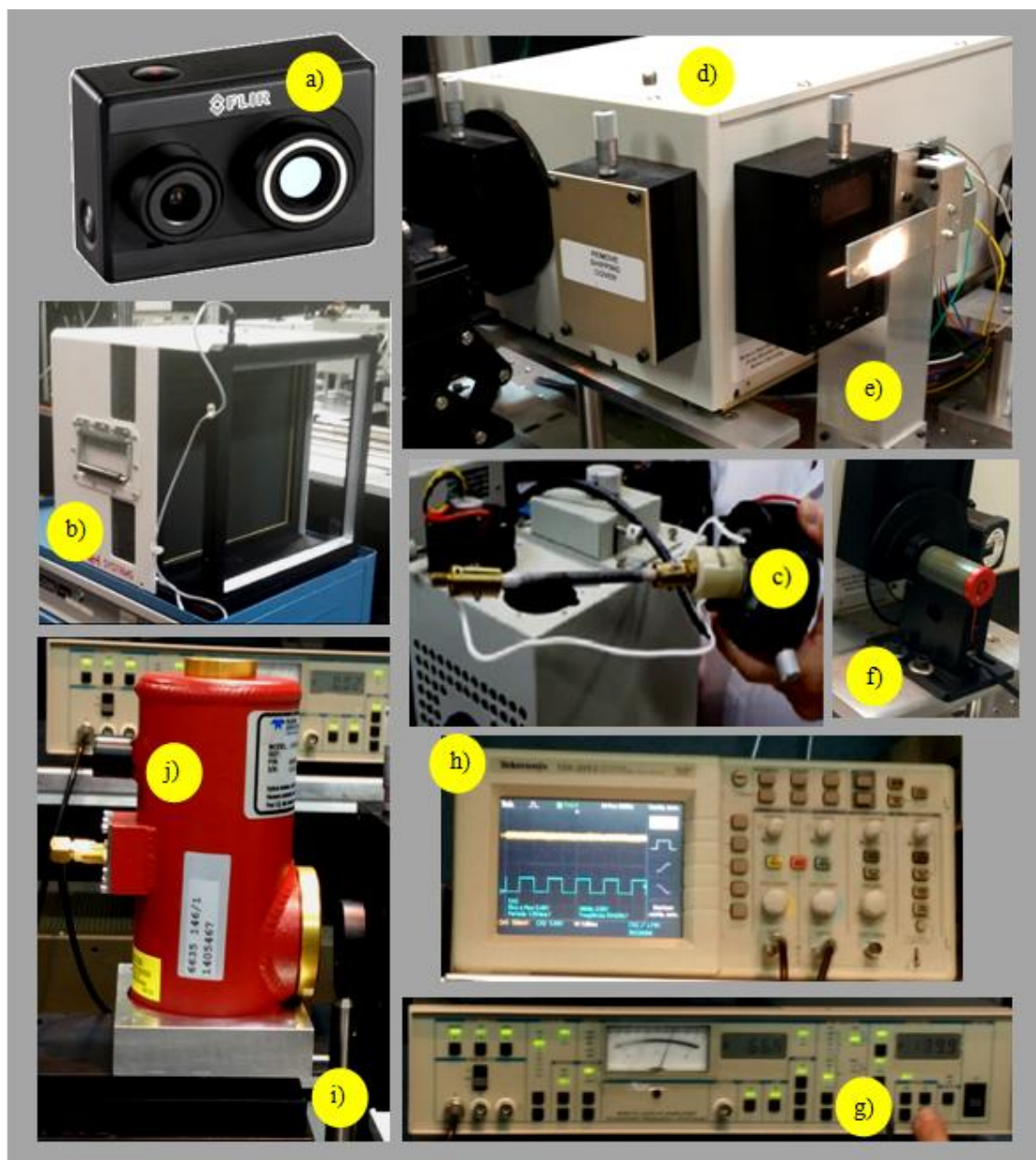
#### 4.1.2 Equipamentos empregados no laboratório

Para uma precisa avaliação dos limites reais de operação do sistema sensor termal, foram realizados três experimentos: a caracterização espectral, a caracterização radiométrica e a caracterização espacial, no Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletro-ópticos (LaRaC), do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), com o auxílio de instrumentos cedidos pelo laboratório.

A Figura 4.1 apresenta os instrumentos utilizados:

- a) Câmera multi-sensor FLIR Duo, da FLIR SYSTEMS (2017);
- b) Corpo Negro Extenso, modelo SR800, da CI Systems (2004);
- c) Globar, um tipo de barra incandescente que fornece sinal em uma ampla faixa do espectro eletromagnético, da Oriel;
- d) Monocromador Acton Spectra Pro 2500i, da ACTON RESEARCH (2003);
- e) Chopper mecânico, fabricado no LaRaC;
- f) Chopper SR540, da Stanford Research Systems;
- g) Amplificador lock-in SR510, da Stanford Research Systems (2013);
- h) Osciloscópio TDS2012, da Tektronix;
- i) Filtro 7300 nm, da Edmund Optics (2009);
- j) Detector de banda larga de referência *Judson Mercury Cadmium Telluride*, modelo J15D16, da Judson Technologies (2002).

Figura 4.1 - Instrumentos utilizados em laboratório para a caracterização radiométrica, espectral e espacial da câmera FLIR Duo.



Fonte: Própria autora.

### 4.1.3 Veículo aéreo não tripulado (VANT)

O veículo aéreo não tripulado utilizado para a captura das imagens termais é um multirrotor do tipo hexacóptero, denominado Matrice 600 Pro (Figura 4.2), fabricado pela empresa DJI. Esse VANT possui funções de voo inteligentes, como modo de decolagem e pouso autônomo, que garantem uma operação segura e estável ao longo de todo processo de obtenção de imagens.

Figura 4.2 - Matrice 600 Pro, veículo aéreo não tripulado (VANT) utilizado para a aquisição das imagens termais aéreas.



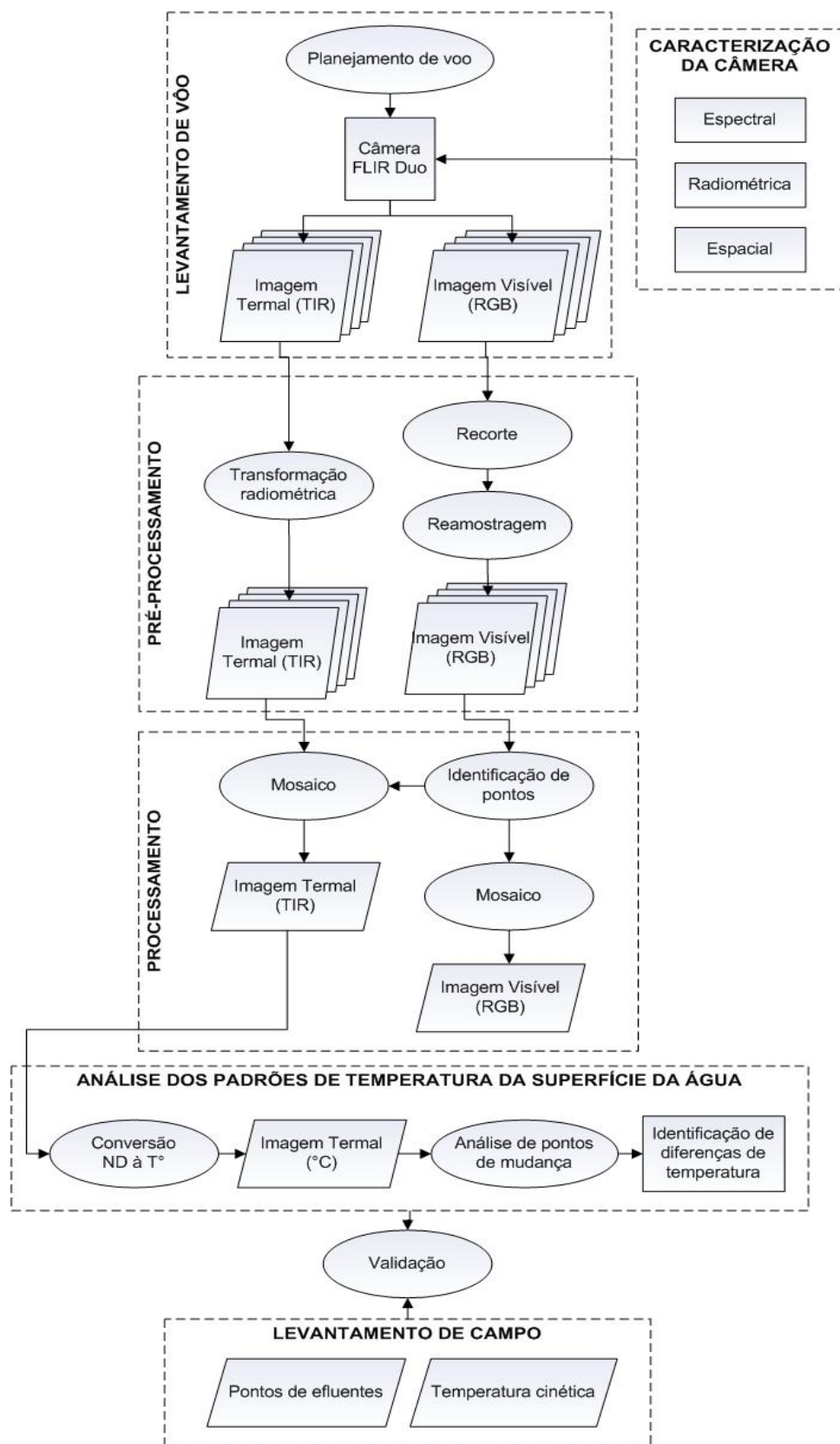
Fonte: DJI (2018).

Além disso, seu design mecânico, com trem de pouso desmontável e braços articulados, facilita o transporte, armazenamento e preparação para o voo, tornando-o ideal para aplicações de monitoramento ambiental (DJI, 2018).

## 4.2 Métodos

A metodologia adotada neste estudo envolveu as seguintes etapas: caracterização do sistema sensor termal; levantamento aéreo para a aquisição das imagens termais; pré-processamento e processamento destas imagens; identificação e análise dos padrões de temperatura da superfície da água, através da estimativa da temperatura e identificação de suas mudanças ao longo do canal principal do corpo de água; e, por fim, a validação desse trabalho a partir de dados obtidos em campo. O fluxograma das atividades desenvolvidas ao longo de cada etapa é apresentado na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Fluxograma da metodologia utilizada neste estudo para a análise da temperatura da superfície da água.



Fonte: Própria autora.

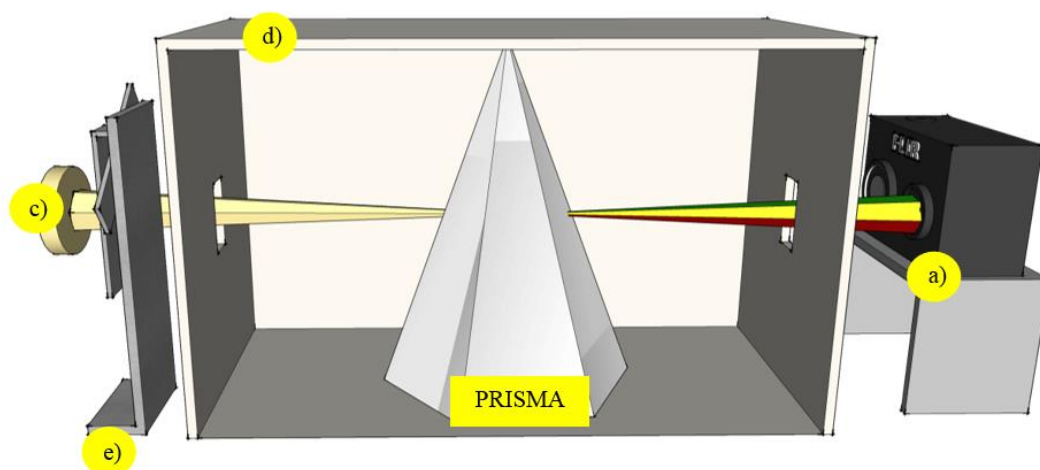
## 4.2.1 Caracterização da câmera FLIR Duo

Para a realização do levantamento aéreo, foi inicialmente necessário avaliar os reais limites de operação do sistema sensor termal que compõe a câmera FLIR Duo. Dessa forma, foram realizados três procedimentos no LaRaC, do Instituto de Estudos Avançados da Aeronáutica, a saber: a caracterização espectral e radiométrica, seguindo as orientações desenvolvidas por Lima Filho (2015) e Oliveira (2017) e a caracterização espacial, de acordo com a metodologia adotada por Boreman (2001) e Silva, R. (2018).

### 4.2.1.1 Caracterização espectral

Para a obtenção da resposta espectral do sistema sensor termal, foi realizada a caracterização espectral indireta a partir da comparação da resposta de um detector de referência e da resposta do sensor eletro-óptico analisado. Por isso, foram realizados dois arranjos experimentais: um para a câmera FLIR Duo (Figura 4.4) e outro para o detector de referência J15D16, da empresa *Judson*.

Figura 4.4 - Esquema do arranjo experimental utilizado para a caracterização espectral da câmera FLIR Duo, em que: a) FLIR Duo; c) fonte infravermelho; d) monocromador; e e) *chopper* mecânico.



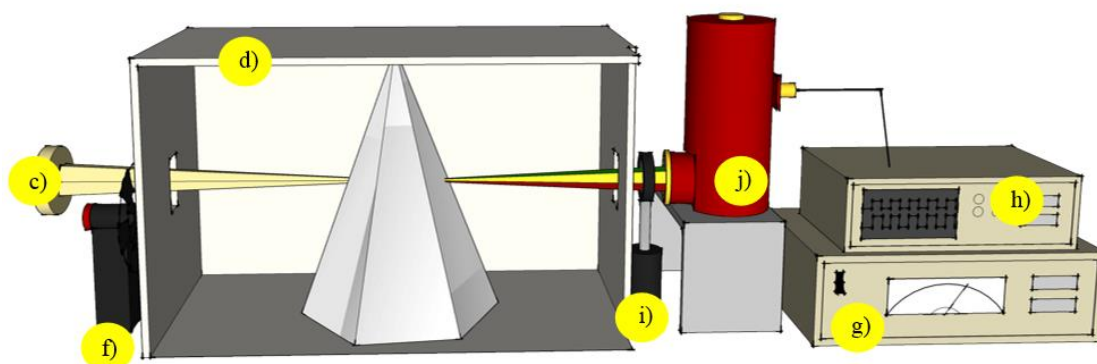
Fonte: Própria autora.

Neste arranjo, a radiação eletromagnética emitida por uma fonte no infravermelho, denominada *Globar*, incide sobre um *chopper* capaz de permitir

ou impedir sua passagem até o monocromador, que por sua vez "seleciona" e projeta a radiação refletida em um determinado comprimento de onda sobre o detector. A diferença entre a excitação dos fotodetectores da câmera na presença (*chopper* aberto) e na ausência (*chopper* fechado) de radiação eletromagnética em um dado comprimento de onda representa a sensibilidade da câmera àquela faixa espectral, permitindo a determinação do espectro de operação da câmera FLIR Duo.

Para a obtenção do sinal registrado pelo detector de referência, foi acrescentado ao arranjo experimental: um filtro com transmitância para comprimentos de onda superiores a 7.300 nm, a fim de evitar a contribuição de comprimentos de onda ( $\lambda$ ) harmônicos àqueles selecionados na grade de difração; um amplificador *lock-in* e um osciloscópio, que possibilitam mensurar, com elevada resolução e detecção de ruídos, a defasagem entre o *chopper* SR540, à uma frequência de 500 Hz, e a tensão verificada pelo detector Judson, conforme visualização na Figura 4.5.

Figura 4.5 - Esquema do arranjo experimental utilizado para a caracterização espectral do detector de referência, *Judson*, sendo c) fonte infravermelho; d) monocromador; f) *chopper* SR540; g) amplificador; h) osciloscópio; i) filtro 730 nm; e j) detector *Judson*.



Fonte: Própria autora.

Os equipamentos utilizados no arranjo experimental possuem funcionamento independente. Por isso foi muito importante a integração dos mesmos através de um programa elaborado por Pinto et al. (2006) em LabVIEW (uma linguagem de programação gráfica desenvolvida pela *National Instruments*). O programa



realiza o controle automático da varredura do feixe monocromático para o intervalo de comprimento de onda determinado pelo usuário e também promove as medições da tensão realizadas pelo amplificador *lock-in* e pelo osciloscópio. As medições foram realizadas automaticamente, com o *chopper* aberto e fechado, para os comprimentos de onda entre 6.000 e 14.000 *nm* com intervalos de 20 *nm*, resultando em 400 medidas no total.

Dessa forma, comparando-se a resposta do sensor de referência com a do sensor que se deseja caracterizar, é possível determinar a Função de Resposta Espectral (FRE) da câmera multissensor FLIR Duo (LIMA FILHO, 2015; OLIVEIRA, 2017).

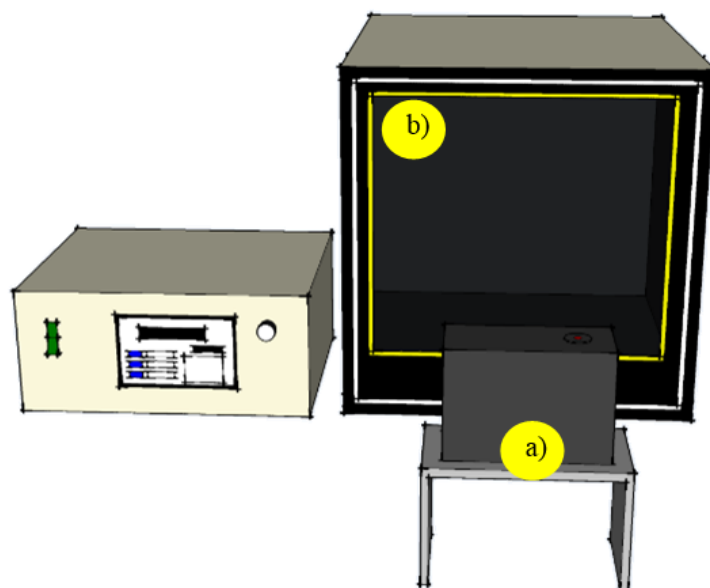
#### **4.2.1.2 Caracterização radiométrica**

Para a caracterização radiométrica, a câmera FLIR Duo foi posicionada perpendicularmente à superfície de um Corpo Negro de Área Extensa (CN), de emissividade 0,98, a uma distância de 0,4 m. A temperatura termodinâmica do CN foi ajustada de 10 a 50° C com o auxílio do controlador, variando de 5 em 5 °C, respeitando-se um intervalo de 10 minutos entre os conjuntos de medição para a estabilização da temperatura da superfície do equipamento. Para cada conjunto de medição, ou seja, cada temperatura ajustada, foram obtidas 10 imagens digitais no formato TIFF com 14 bits.

O sinal elétrico gerado pelo detector do sistema sensor é amplificado, filtrado, corrigido e registrado em nível digital (ND) (OLIVEIRA, 2017). Assim, para cada pixel da imagem digital, é atribuído um valor de ND referente aos valores de radiância que chegam ao sistema sensor. Dessa forma, são calculados parâmetros estatísticos – média, desvio padrão, máximos e mínimos – dos valores de ND atribuídos ao corpo negro na imagem a fim de estabelecer uma relação linear onde cada nível digital da imagem obtida pelo sensor pode ser associado a um valor de radiância proveniente de uma fonte conhecida através de um fator multiplicativo (ganho) e a soma de um termo independente (*offset*) (LIMA FILHO, 2015; OLIVEIRA, 2017).

O diagrama do arranjo experimental está representado na Figura 4.6.

Figura 4.6 - Esquema do arranjo experimental utilizado para a caracterização radiométrica da câmera FLIR Duo, sendo: a) FLIR Duo e b) Corpo Negro de Área Extensa.



Fonte: Própria autora.

#### 4.2.1.3 Caracterização espacial

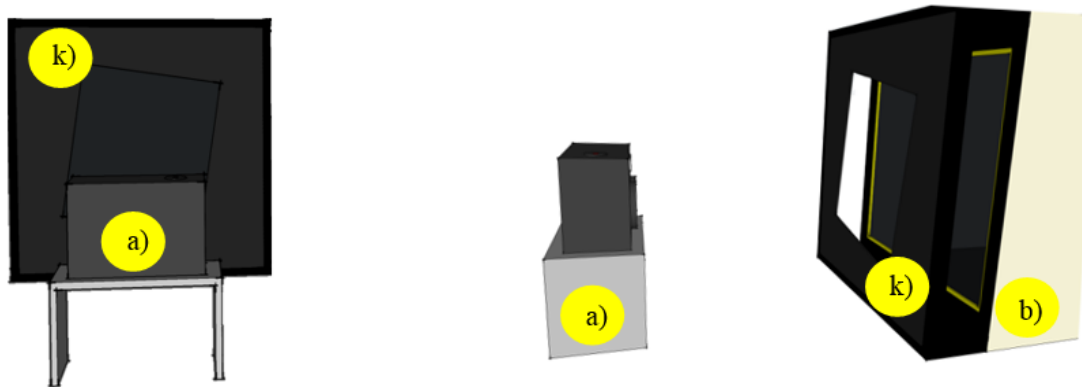
A caracterização espacial da câmera FLIR Duo foi realizada através do cálculo da *Modulation Transfer Function* (MTF), uma função que permite avaliar a capacidade de um sistema imageador em reproduzir um pequeno sinal entre grandes contrastes.

Para obter a MTF, acrescentou-se ao arranjo experimental utilizado para determinar as características radiométricas da câmera FLIR Duo, um alvo vazado (k) de 15 por 15 cm fixado à superfície do CN (Figura 4.7). O alvo padrão possui inclinação de  $6^\circ$  em relação a sua vertical, o que possibilita a leitura do valor dos pixels em várias linhas consecutivas, garantindo uma representação mais precisa da ESF. A temperatura do CN foi ajustada para  $50\text{ }^\circ\text{C}$ , a fim de construir uma transição claro-escuro, já que o alvo estava a uma temperatura significativamente mais baixa.

Foram obtidas imagens digitais com a câmera FLIR Duo nas distâncias de 0,30 m, 0,50 m, 0,75 m e 1,00 m, visto que o manual da câmera não fornece

informações quanto à distância focal do equipamento eletro-óptico. Desse modo, as MTFs vertical e horizontal foram calculadas para cada distância com a ajuda de um *plug-in* do MATLAB Sfrmat3, que calcula a MTF de acordo com o padrão ISO 12233 de resolução e resposta em frequência espacial (SILVA R., 2018).

Figura 4.7 - Esquema do arranjo experimental para a caracterização espacial da câmera termal, sendo: a) FLIR Duo; b) Corpo Negro de Área Extensa; e k) alvo vazado.



Fonte: Própria autora.

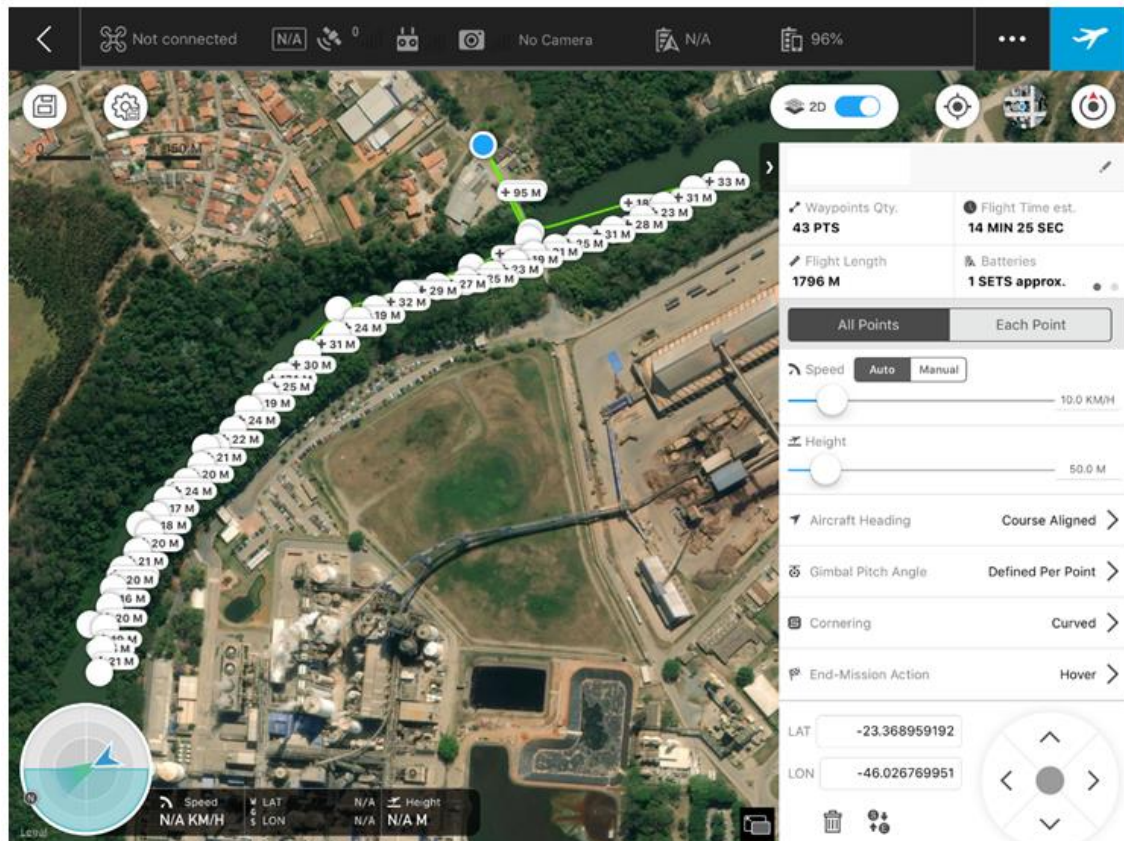
#### 4.2.2 Levantamento aéreo

A coleta das imagens com o VANT foi realizada em 19/12/2018, por volta das 12:00 h., ao longo de aproximadamente 720 metros do canal do rio Paraíba do Sul. Para tanto, um planejamento de voo foi realizado com o *software Ground Station Pro*, da empresa DJI, em que foram consideradas as características espaciais do sensor termal na câmera FLIR Duo e as particularidades da região de estudo.

Inicialmente, considerando a vegetação margeando o corpo hídrico, determinou-se que o sensor deveria estar a uma altura de 50 metros em relação à superfície do terreno. Os recobrimentos longitudinais deveriam ser de pelo menos 90%, conforme recomendação do Guia de Iniciantes disponibilizado pelo *software*, a fim de facilitar a identificação de pontos homólogos em várias imagens adjacentes (PIX4D, 2016). Assim o voo foi programado para ser realizado a uma velocidade média de 10 km/h, apresentando 43 pontos de voo, sendo a distância

entre eles de aproximadamente 40 metros, possibilitando que a área total equivalente a 3,65 ha fosse sobrevoada em menos de 15 minutos. O plano de voo elaborado é apresentado na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Planejamento do voo realizado com o software *Ground Station Pro* para a aquisição das imagens termais aéreas sobre o rio Paraíba do Sul.



Fonte: Própria autora.

A aquisição das imagens foi programada para intervalos de 1s, o que possibilitou a aquisição de 363 imagens RGB e TIR simultaneamente. Os dados coletados pelo sensor termal foram registrados em formato de imagem (.tif), em que cada pixel recebe um valor de nível digital (ND) que está diretamente ligado a temperatura do corpo terrestre imageado.

### 4.2.3 Pré-processamento das imagens termais aéreas

O par de imagens RGB e TIR, apesar de ter sido obtido simultaneamente de uma mesma câmera (FLIR Duo), ou seja, a uma mesma altura e posição do espaço, apresenta cenas diferentes. Por isso, considerando a calibração da câmera, o pré-processamento das imagens realizado com o *software* MATLAB (APÊNDICE A; APÊNDICE B), foi conduzido como segue:

- i. a imagem RGB foi recortada a partir de uma máscara de dimensão [188, 0, 1470, 1080], para que a área imageada coincida com a TIR correspondente;
- ii. as imagens TIR foram reamostradas, [1080, 1471] pixels, para que o número de pixels seja o mesmo em ambas as imagens - no caso, o número de pixels da imagem RGB após ser recortada;
- iii. as imagens TIR foram ainda submetidas a uma conversão radiométrica de 14 para 8 bits, a partir de uma normalização realizada considerando os valores de ND máximos e mínimos da série de imagens.

### 4.2.4 Processamento das imagens termais aéreas

As imagens aéreas foram processadas com o objetivo de gerar um único ortomosaico da seção do rio Paraíba do Sul. A primeira etapa deste processamento consistiu na detecção de pontos homólogos, ou seja, pontos que aparecem em duas ou mais fotografias. A qualidade final dos produtos obtidos depende diretamente do número e distribuição destes pontos.

Apesar dos avanços ocorridos nas últimas décadas em relação as câmeras infravermelho termais disponíveis no mercado (WEBER et al., 2015), a identificação dos pontos homólogos em imagens termais é prejudicada devido à baixa resolução e homogeneidade da imagem. As imagens não apresentam feições bem definidas, principalmente quando se trata de uma superfície d'água, por isso, o grande desafio foi obter um mosaico de qualidade e com maior precisão possível através dos recursos disponíveis.

A utilização de imagens multiespectrais pode favorecer a identificação de pontos homólogos e, conseqüentemente, facilitar o processamento e interpretação das imagens termais. Diante disso, foi realizado no *software* livre *RStudio* (APÊNDICE C), um empilhamento (*stacking*) das bandas que compõem as imagens RGB e TIR, produzindo uma única imagem de quatro bandas espectrais: vermelha (R), verde (G), azul (B) e termal (TIR).

A seguir cada imagem gerada foi inserida ao *software* PhotoScan, desenvolvido pela Agisoft LLC, que utiliza as bandas RGB de alta resolução para identificar os pontos homólogos e, assim, gerar um mosaico, não georreferenciado, das imagens obtidas com a câmera FLIR Duo. Em resumo, o fluxo de trabalho realizado foi: i) o alinhamento das imagens através da identificação de pontos homólogos; ii) o ajuste dos parâmetros de orientação exterior e interior, ligados à trajetória do voo e movimentos da plataforma; iii) a densificação da nuvem de pontos, diminuindo os espaços vazios na imagem; iv) a reconstrução do terreno a partir da construção de um modelo tridimensional obtido da intersecção dos pontos de nuvem; e v) por fim, a transformação da projeção central da imagem em projeção ortogonal, gerando o produto final: um ortomosaico.

A etapa de registro automático ainda foi testada no *software* *MATLAB*, que utiliza linguagem de programação para o processamento das imagens, a fim de se obter um mosaico ainda mais preciso da região em estudo. Para isso, as imagens RGB e TIR foram trabalhadas em separado, diferentemente do que foi testado anteriormente. Assim, foi estimada a transformação que melhor relaciona o posicionamento entre um ponto identificado na imagem RGB e o mesmo ponto da imagem TIR.

As características da imagem, neste trabalho denominadas de Pontos Homólogos, foram então identificadas mediante a utilização do detector SIFT, descrito por Lowe (1999, 2004) e fornecido pela MathWorks - biblioteca *MATLAB*. Após identificar pontos correspondentes em duas ou mais imagens sequenciais, foi utilizado o algoritmo RANSAC para tratar os *outliers* e retornar uma matriz 3x3, denominada matriz de homografia, que fornece as coordenadas X, Y (linha, coluna) de cada ponto nas imagens RGB. As coordenadas foram

concatenadas às imagens TIR correspondentes e, então corrigidas e sobrepostas de acordo com o número de pontos identificados. O mosaico gerado por duas imagens casadas foi utilizado para identificar novos pontos homólogos em uma terceira imagem e assim sucessivamente, até a elaboração de um único mosaico (um RGB e um TIR) composto por todas as imagens.

Uma rotina de cálculos utilizada neste processamento encontra-se no APÊNDICE D.

#### **4.2.5 Levantamento em campo**

Simultaneamente ao levantamento aéreo, foram realizadas medidas de temperatura da água ao longo trecho estudado do rio Paraíba do Sul. O acesso ao rio foi possível com a utilização de um barco. As medidas de temperatura foram obtidas com o auxílio de um multímetro, com precisão em graus, enquanto a identificação de afluentes e efluentes no rio foi realizada por identificação visual.

#### **4.2.6 Determinação da temperatura cinética da água**

O sensor termal registra a temperatura radiante (T) da superfície da água em valores de número digital (ND). Com a calibração radiométrica da câmera FLIR Duo, foi possível determinar a função que melhor descreve a relação entre o ND e a T(° C). Dessa forma, através da ferramenta *Raster Calculator*, do *software* ArcGIS 10.1, foi implementada a expressão algébrica obtida em todas as imagens TIR.

Para a validação deste resultado, foi realizada uma análise da temperatura cinética da superfície da água obtida por meio dos dados de sensoriamento remoto com as medições em campo.

#### **4.2.7 Detecção de diferenças de temperaturas**

Para a detecção de diferentes temperaturas ao longo do trecho do rio Paraíba do Sul estudado, foi utilizada a análise do ponto do nível digital médio ( $\mu$ ) no sentido longitudinal e no sentido transversal de algumas imagens TIR. Para tanto foi aplicado o algoritmo *Segment Neighborhood* (tradução livre – Segmentação por Vizinhança), proposto por Auger e Lawrence (1989), no *software* estatístico RStudio (APÊNDICE E).

Os locais de contribuição de efluentes identificados em campo serviram como dados de validação para a detecção dos fluxos com diferentes temperaturas.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, são apresentados inicialmente os resultados e análises das caracterizações do sistema sensor termal realizadas em laboratório. Posteriormente são apresentados os resultados do processamento das imagens aéreas termais. Finalizando, é demonstrado o desempenho das técnicas para obter a temperatura da superfície da água do rio Paraíba do Sul, bem como os fluxos com diferentes temperaturas no canal principal do corpo hídrico.

### 5.1 Caracterização do sistema sensor

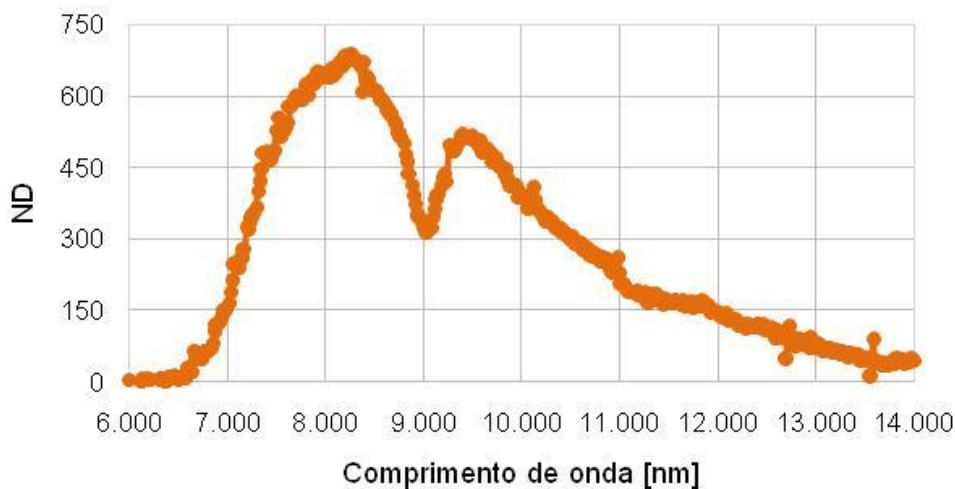
A caracterização do sistema sensor termal da câmera FLIR Duo forneceu resultados que foram utilizados para realizar as correções pertinentes nas imagens termais.

#### 5.1.1 Caracterização espectral

Com base na metodologia proposta, para a obtenção da resposta espectral do sistema sensor termal ( $FRE_{\text{sensor}}$ ) na câmera FLIR Duo, foi realizada a caracterização espectral indireta a partir da utilização de um detector de referência.

A Figura 5.1 apresenta a contribuição do sinal obtido pelo sensor,  $S_{\text{sensor}}$ , em número digital, para cada comprimento de onda. Os valores foram obtidos pela diferença entre os números digitais médios registrados com o *chopper* aberto e fechado, reproduzindo a leitura da câmera quando há (situação aberto) ou não há (situação fechado) radiação incidente.

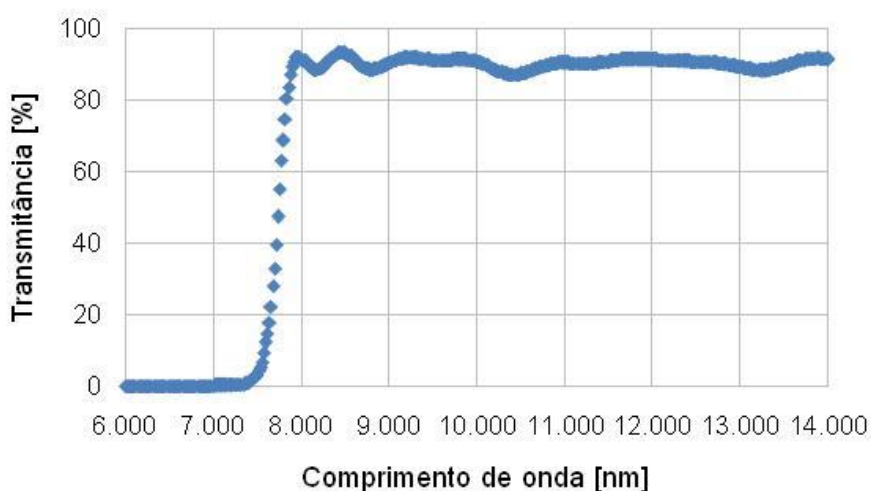
Figura 5.1 - Sinal, em ND, registrado pelo sistema sensor termal da câmera FLIR Duo ( $S_{sensor}$ ) em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ).



Fonte: Própria autora.

Observando a curva gerada pela resposta do sensor verifica-se que a radiação eletromagnética começa a ser detectada próximo ao comprimento de onda 6500 nm, corroborando as especificações de operação da câmera FLIR Duo. Dessa forma, para evitar a contribuição de comprimentos de onda harmônicos à faixa espectral empregada na grade de difração (6.000 a 14.000 nm), foi utilizado, para as medidas realizadas com o detector de referência *Judson*, um filtro cuja transmitância é apresentada na Figura 5.2.

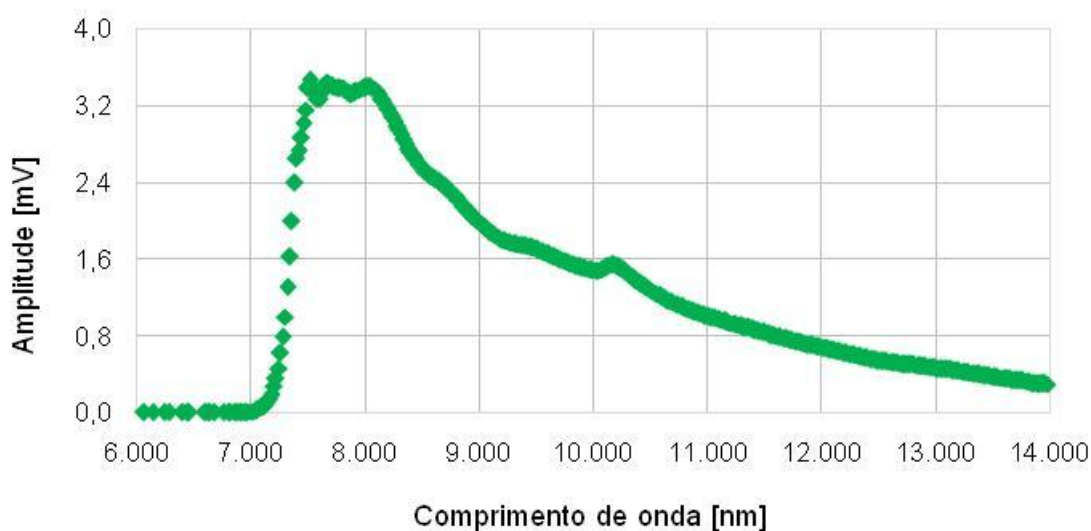
Figura 5.2 - Transmitância, em porcentagem, do filtro ( $FRE_{filtro}$ ) utilizado na caracterização espectral do detector *Judson*.



Fonte: Própria autora.

Conforme a curva de transmitância ( $FRE_{\text{filtro}}$ ) disponibilizada pelo fabricante do material, o filtro utilizado impede a passagem da radiação eletromagnética em comprimentos de onda inferiores a 7.200 nm, enquanto nos comprimentos de onda superiores a 7.900 nm a transmitância do filtro varia pouco, ficando próxima dos 90%. Assim sendo, a Figura 5.3 exibe a amplitude do sinal, representada em tensão, detectada pelo sensor de referência *Judson* ( $S_{\text{ref}}$ ).

Figura 5.3 - Amplitude de tensão obtida pelo detector *Judson* ( $S_{\text{ref}}$ ) em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ).



Fonte: Própria autora.

A tensão registrada pelo sensor *Judson* foi mais significativa em comprimentos de onda superiores devido à transmitância do filtro empregado no arranjo experimental. Isso prova que o sinal registrado é proporcional à radiação eletromagnética que incide sobre o detector.

A função de resposta espectral ( $FRE_{\text{ref}}$ ) do detector de referência utilizado foi disponibilizada pelo manual do fabricante. A curva de resposta do detector interpolada para os comprimentos de onda de interesse (6.000 a 14.000 nm) está representada na Figura 5.4.

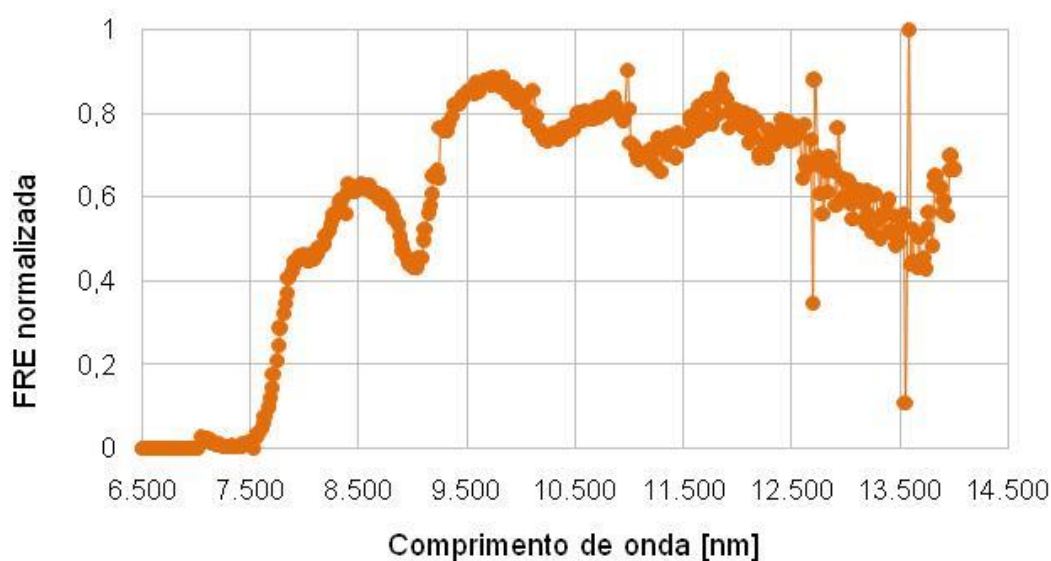
Figura 5.4 - Função de Resposta Espectral do detector *Judson* ( $FRE_{ref}$ ) em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ).



Fonte: Adaptado de JUDSON TECHNOLOGIES LLC (2002).

Assim, sendo conhecidas as variáveis  $S_{sensor}$  (Figura 5-1),  $S_{ref}$  (Figura 5.3),  $FRE_{ref}$  (Figura 5.4) e  $FRE_{filtro}$  (Figura 5.2), pode-se calcular a FRE do sensor termal na câmera FLIR Duo utilizando a Equação 2.16. A FRE normalizada da câmera está apresentada na Figura 5.5.

Figura 5.5 - Função de Resposta Espectral normalizada do sistema sensor termal da câmera FLIR Duo ( $FRE_{sensor}$ ) em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ), obtida por meio da caracterização espectral.



Fonte: Própria autora.

Após a caracterização espectral verificou-se o comportamento real do sensor para o intervalo de comprimento de onda analisado. Constatou-se que o sensor começa a detectar o fluxo incidente a partir de 7.500 nm, apresentando maior sensibilidade nos comprimentos de onda próximos a 9.800 nm. Em comprimentos de onda superiores a 11.500 nm são observados ruídos que permanecem até o final do intervalo de medição.

Durante a passagem da radiação eletromagnética através da atmosfera, a mesma interage com as moléculas dos constituintes gasosos e com o material particulado em suspensão na atmosfera (MENESES, 2012). Por isso, segundo Oliveira (2017) e Silva N. (2018), este comportamento em comprimentos de onda maiores pode ser explicado pela presença de pequenas faixas de absorção de:

- vapor d'água (H<sub>2</sub>O): que é o gás que interfere na captura de dados termais nas camadas mais baixas da atmosfera, com zonas de absorção a partir 12.000 nm;
- gás carbônico (CO<sub>2</sub>): com uma larga faixa de absorção que se inicia em torno dos 13.000 nm estendendo-se até próximo a 17.000 nm.

Outros gases podem interferir no fluxo da radiação solar e da radiação emitida pelos alvos na superfície terrestre. Essa interação está diretamente ligada à sua concentração na atmosfera, que depende da localidade, do sistema atmosférico ou da estação do ano (OLIVEIRA, 2017). Assim por exemplo, o ozônio (O<sub>3</sub>) apresenta bandas de absorção posicionadas entre 9.000 e 9.500 nm, com maiores atenuações ocorrendo entre as altitudes de 15 e 25 km, muito acima daquelas utilizadas no levantamento aéreo com VANTs.

Vale ressaltar que muitos estudos baseados em Lorenz (1968) desconsideraram a influência da atmosfera na aquisição de dados de temperatura dos corpos terrestres em altitudes inferiores a 500 *ft*, isto é, aproximadamente 150 m (OLIVEIRA, 2017; SILVA N., 2018; DERENNE, 2003).

### 5.1.2 Caracterização radiométrica

Utilizando os procedimentos previamente descritos na Seção 2.2.2, foram obtidos os parâmetros estatísticos dos valores de ND registrados pela câmera FLIR Duo para as diversas temperaturas selecionadas no Corpo Negro, conforme pode ser visto na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Parâmetros estatísticos dos valores de ND em função da temperatura ajustada no Corpo Negro de Área Extensa, obtidos por meio da caracterização radiométrica.

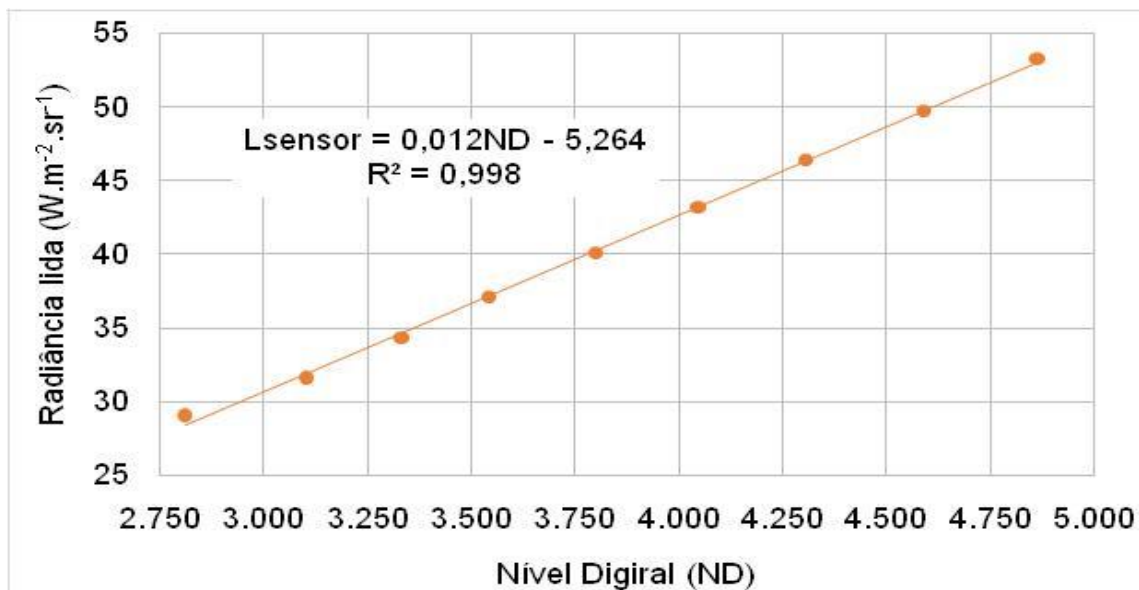
| Temperatura(°C) | ND    |        |        |       | Desvio Padrão |
|-----------------|-------|--------|--------|-------|---------------|
|                 | Média | Máximo | Mínimo | Moda  |               |
| 10              | 2.811 | 3.012  | 2.749  | 2.816 | 14            |
| 15              | 3.104 | 3.232  | 3.045  | 3.111 | 14            |
| 20              | 3.331 | 3.387  | 3.272  | 3.339 | 14            |
| 25              | 3.542 | 3.590  | 3.433  | 3.551 | 16            |
| 30              | 3.801 | 3.848  | 3.557  | 3.806 | 15            |
| 35              | 4.046 | 4.097  | 3.684  | 4.045 | 17            |
| 40              | 4.306 | 4.364  | 3.820  | 4.300 | 19            |
| 45              | 4.591 | 4.649  | 3.999  | 4.586 | 21            |
| 50              | 4.862 | 4.928  | 4.145  | 4.856 | 25            |

Fonte: Própria autora.

Mediante os valores de níveis digitais (ND) médios obtidos para cada temperatura cinética do Corpo Negro de Área Extensa, obteve-se uma curva que melhor descreve como o sensor da câmera responde ao estímulo de temperatura, considerando um corpo cinza cuja emissividade de 0,98 não varia em função do comprimento de onda ( $\lambda$ ) (Figura 5.6).

Dessa forma, foi obtida uma função de conversão radiométrica da câmera FLIR Duo através da estimativa da radiância, em  $W/m^2$ . Para tanto foi considerada a Lei de Planck (Equação 2.2), para obter a exitância do Corpo Negro e, posteriormente, a Equação 2.17, para o cálculo da  $L_{\text{sensor}}$  em função das temperaturas de 10 a 50° C.

Figura 5.6 - Radiância medida pelo sensor da câmera, para cada temperatura ajustada no Corpo Negro, em função do ND médio das imagens termais.



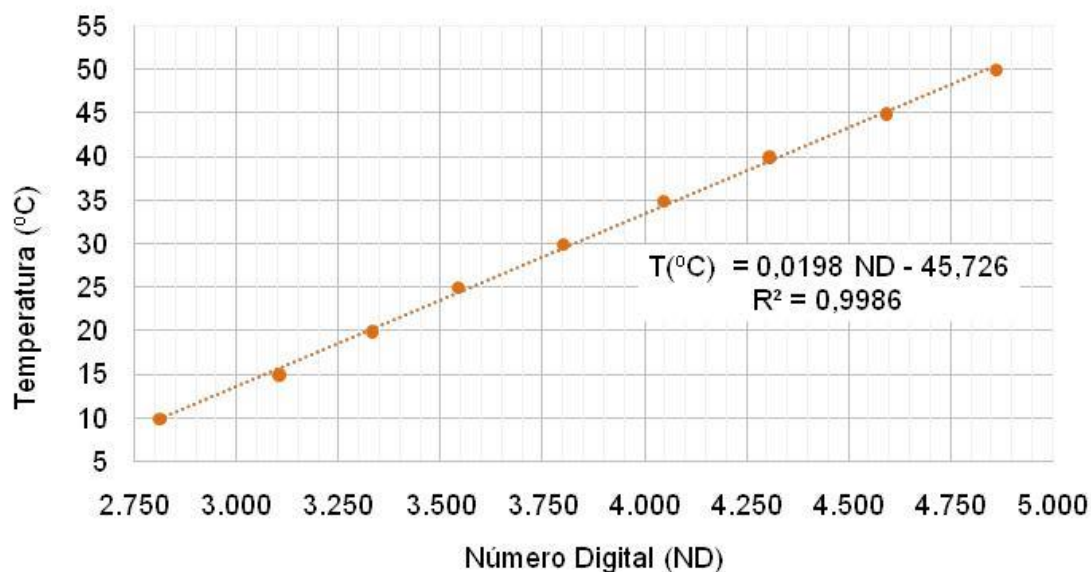
Fonte: Própria autora.

A partir dessa relação, é possível estimar a função de calibração radiométrica da câmera FLIR Duo para a estimativa da radiância (Equação 2.26), considerando 95% de intervalo de confiança e determinação ( $R^2$ ) de 0,998.

$$L_{\text{sensor}}(W.m^{-2}.sr^{-1}) = 0,012 ND - 5,264 \quad (2.26)$$

Outra comparação foi realizada entre os valores medidos pelo sensor e aqueles ajustados no CN. Nesse caso calculou-se a temperatura radiante medida pelo sistema sensor FLIR Duo por meio dos valores médios de ND das imagens.

Figura 5.7 - Função de conversão entre temperatura termodinâmica e o ND obtido pelo sistema sensor termal da câmera FLIR Duo, considerando a emissividade constante do Corpo Negro de Área Extensa ( $\varepsilon = 0,98$ ).



Fonte: Própria autora.

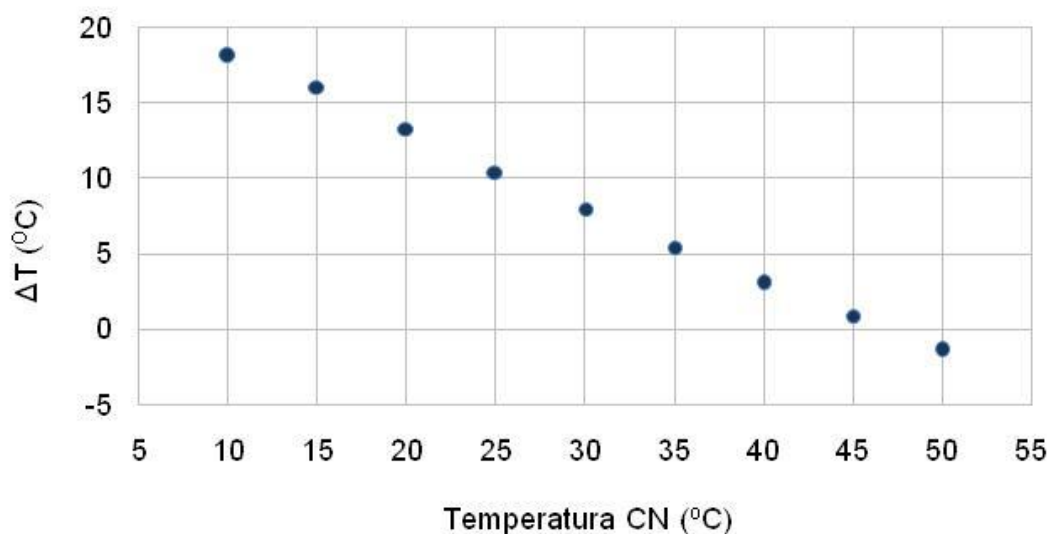
A relação entre os valores de ND e os valores de temperatura se assemelha a uma função de primeiro grau, como observado na Figura 5.7. Dessa forma, a função de calibração radiométrica da câmera FLIR Duo para a estimativa de temperatura de um corpo real (Equação 2.27), considerando 95% de intervalo de confiança e determinação ( $R^2$ ) de 0,9986, é:

$$T_{CN}(^{\circ}C) = 0,0198 ND - 45,726 = T_{CR} \sqrt[4]{\frac{\varepsilon_{CN}}{\varepsilon_{CR}}} \quad (2.27)$$

A equação encontrada, porém, difere daquela prevista pelo Manual da FLIR Duo, elaborada pelo fabricante. Segundo o documento, a conversão de valores de ND para temperatura ( $^{\circ}C$ ) é realizada através da multiplicação dos valores de cada pixel da imagem por 0,01 (FLIR SYSTEMS, 2017). A Figura 5.8 apresenta a diferença entre a temperatura estimada segundo a conversão do fabricante e a temperatura real atribuída ao Corpo Negro.



Figura 5.8 - Diferença entre as temperaturas ajustadas ao Corpo Negro e àquelas estimadas pela função de conversão proposta nos manuais do fabricante da câmera FLIR Duo.



Fonte: Própria autora.

Nesse caso, o gráfico demonstra que para temperaturas inferiores a 35° C a conversão proposta pelo fabricante extrapola as incertezas de  $\pm 5^{\circ} \text{C}$  ou  $\pm 5\%$  declarada pelo fabricante (FLIR SYSTEMS, 2017). Vale ressaltar que quanto mais baixa for a temperatura, maior será o erro desta função de conversão utilizada para estimar a temperatura cinética de um corpo. Quando o Corpo Negro foi submetido a temperatura de 10° C, a diferença entre a temperatura real e a calculada foi de pelo menos 17° C, considerando o valor mínimo de ND na imagem digital.

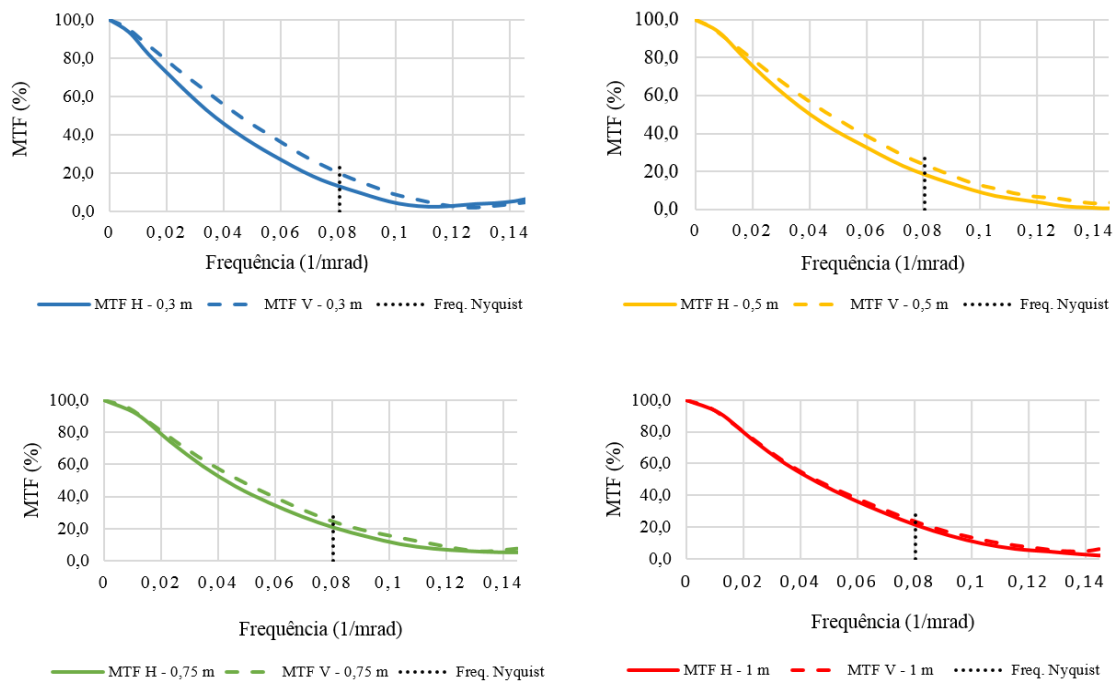
### 5.1.3 Caracterização espacial

Inicialmente, através da Equação 2.18, foi possível calcular a dimensão mínima detectada entre dois elementos imageados que é dada pelo Campo de Visada Instantâneo (IFOV) da câmera. Dessa forma, o IFOV horizontal e o IFOV vertical são, respectivamente, 0,0062177 m/pixel e 0,0063995 m/pixels. Estes parâmetros foram muito importantes no pré-processamento das imagens, principalmente no redimensionamento das imagens RGB.

A capacidade de modulação espacial da câmera, como pode ser observado pelos valores de  $FOV_h \neq FOV_v$ , não é igual nos sentidos horizontal e vertical devido ao formato e área útil do fotodetector termal. Para analisar as MTFs da câmera FLIR Duo, foi necessário definir o limite de resolução óptica da câmera a partir do cálculo da frequência de Nyquist, obtida por meio da Equação 2.19. Dessa forma, para frequências superiores a  $0,0845 \text{ mrad}^{-1}$ , o sistema sensor infravermelho termal não será capaz de reconstruir a imagem de um alvo.

Na Figura 5.9, são apresentadas as MTFs vertical e horizontal para cada distância analisada.

Figura 5.9 - MTFs verticais (MTF V) e horizontais (MTV H) do sensor termal da câmera FLIR Duo para diferentes distâncias.



Fonte: Própria autora.

Para todas as condições de medição (diferentes distâncias), verificou-se que a capacidade de modulação vertical apresenta valores um pouco maiores do que a modulação horizontal. Essa variação pode ser melhor visualizada ao comparar as modulações na frequência de *Nyquist*, como mostra a Tabela 5.2

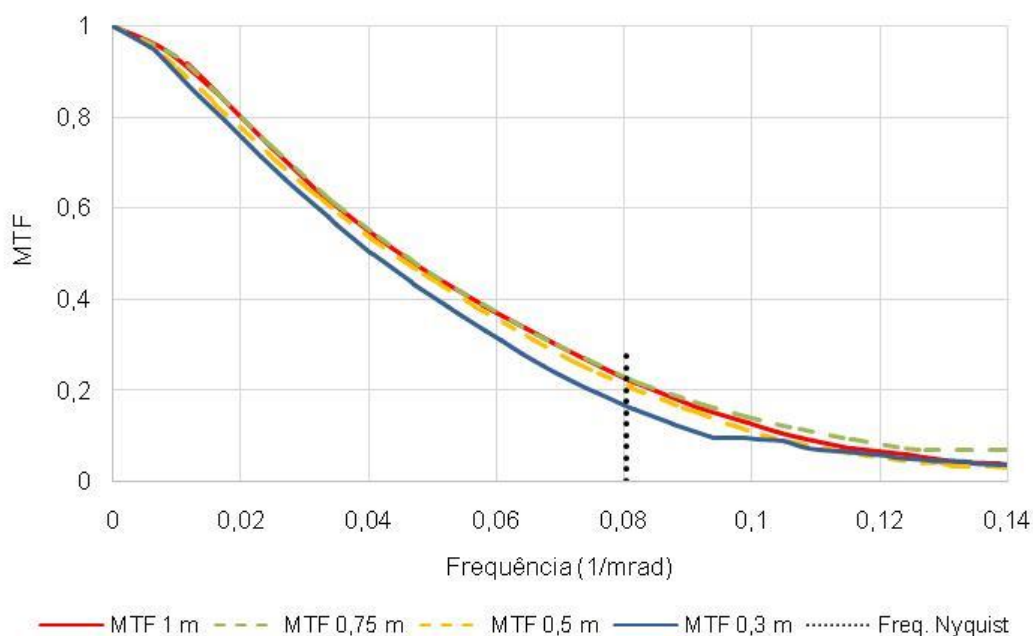
Tabela 5.2 - Valores de modulação horizontal (MTF H), vertical (MTF V) e resultante (MTF) na frequência de *Nyquist*.

| Distância | MTF H | MTF V | MTF  |
|-----------|-------|-------|------|
| 0,30 m    | 0,13  | 0,20  | 0,12 |
| 0,50 m    | 0,18  | 0,26  | 0,19 |
| 0,75 m    | 0,21  | 0,25  | 0,23 |
| 1,00 m    | 0,21  | 0,24  | 0,22 |

Fonte: Própria autora.

A MTF da câmera FLIR Duo é, então, obtida pelos valores médios das modulações horizontais (MTF H) e verticais (MTV V), como mostra a Figura 2.10.

Figura 5.10 - MTF do sensor termal da câmera FLIR Duo em função das distâncias 0,30 m, 0,50 m, 0,75 m e 1,0 m.



Fonte: Própria autora.

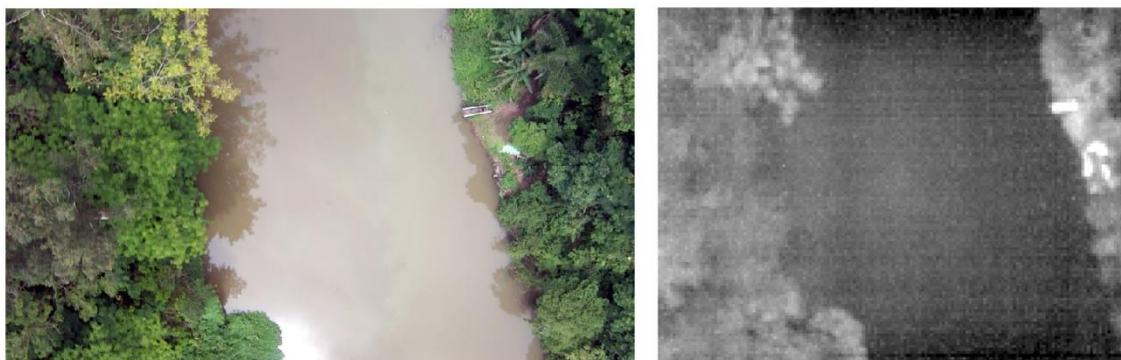
Pelos dados acima apresentados, é possível identificar que os valores de modulação resultante para as distâncias de 0,75 m e 1,00 m foram muito semelhantes. Por isso, apesar da falta de informação pelo fabricante, pode-se afirmar que a distância focal do sistema sensor termal da câmera FLIR Duo encontra-se neste intervalo. Dessa forma, alvos posicionados a uma distância superior a 0,75 m uns dos outros não sofrem distorções na imagem e podem ser facilmente detectados.

## 5.2 Levantamento aéreo

Em campo, 363 pares de imagens RGB e TIR foram obtidos simultaneamente através da câmera FLIR Duo, como exemplificado na Figura 5.10. As imagens RGB foram registradas em formato JPEG, 8 bits, com resolução de 1.920x1.080 pixels e FOV de 90°. O formato TIFF refere-se ao dado do sensor termal bruto de 14 bits, com resolução de 160x120 pixels, permitindo o registro de temperaturas que variam entre  $-20^{\circ}\text{C}$  e  $+60^{\circ}\text{C}$ .

Apesar de o par de imagens ser obtido no mesmo instante, ou seja, a uma mesma altura e posição no espaço, as cenas registradas nas imagens são diferentes. Isso ocorre, pois, as características dos sistemas sensores na câmera são distintas. Por exemplo, o sensor responsável pela aquisição das imagens na faixa do visível contém um campo de visão (FOV) maior do que o sistema sensor termal, o que faz com que a imagem RGB registre uma cena mais larga em relação a sua TIR correspondente (Figura 5.11).

Figura 5.11 - Par de imagens RGB e TIR obtidas pela câmera FLIR Duo por meio de um levantamento aéreo realizado sobre um trecho do rio Paraíba do Sul.



Fonte: Própria autora.

Além disso, as imagens RGB possuem dimensões (linhas e colunas) muito superiores às termais, como pode ser observado na Figura 5.12. Essa dimensão maior favorece a identificação de pontos homólogos entre as imagens sequenciais obtidas com o VANT, já que o maior número de pixels aumenta a possibilidade de interações entre as imagens, facilitando o processamento das imagens aéreas.

Figura 5.12 - Par de imagens TIR e RGB obtidas pela câmera FLIR Duo em suas dimensões originais.



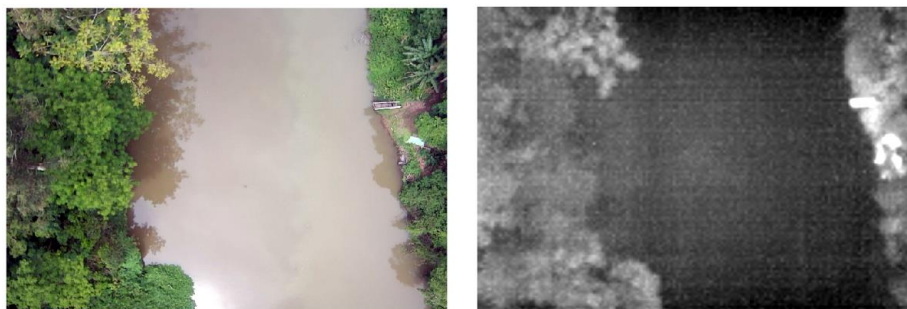
Fonte: Própria autora.

### 5.3 Pré-processamento das imagens aéreas

Para o processamento das imagens aéreas, foi utilizada uma metodologia de casamento de características com base em técnicas de registro automático e manual de imagem. Apesar do registro de imagens ser a sobreposição de cenas de uma mesma área capturadas em instantes, pontos de vista ou sensores distintos, estas técnicas não podem ser aplicadas diretamente em imagens de naturezas distintas, como é o caso neste trabalho (SILVA, 2016; SILVA R., 2018, BRAGA, 2018).

Dessa forma, para possibilitar a utilização das imagens RGB como referência para o processamento das imagens aéreas no espectro infravermelho termal, recorre-se a um pré-processamento das imagens resultando em: imagem RGB recortada, de 1.080x1.471 pixels e 8 bits; e imagem TIR, de 1.080x1.471 pixels e valores de ND variando de 0 a 255 (8 bits). A Figura 5.13, apresentada a seguir, exemplifica o pré-processamento realizado em todas as imagens aéreas adquiridas.

Figura 5.13 - Par de imagens RGB e TIR obtidas com a câmera FLIR Duo após o seu pré-processamento.



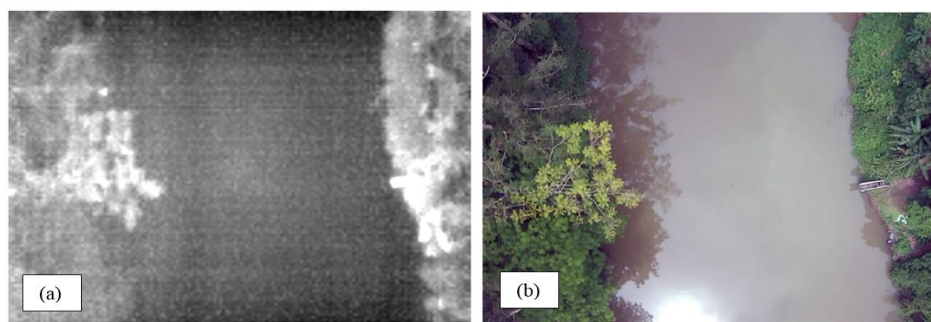
Fonte: Própria autora.

Assim, conclui-se que as imagens RGB e TIR capturadas no levantamento aéreo apresentam sobreposição total e, então, os pontos homólogos identificados na imagem visível localizam-se na mesma posição (linhas e colunas) em ambas as imagens.

#### 5.4 Processamento das imagens aéreas

O empilhamento (*stacking*) das bandas que compõem as imagens RGB e TIR gerou uma única imagem, no formato TIFF, de 1.080x1.471 pixels e quatro bandas espectrais (Figura 5.14). Dessa forma, a interpretação visual da imagem multiespectral foi facilitada através da composição colorida RGB e ao mesmo tempo os valores radiométricos das bandas originais não foram alterados, preservando, assim, os dados termais brutos oriundos da imagem TIR.

Figura 5.14 - Imagem resultante do empilhamento (*stacking*) das bandas espectrais, em que: (a) é a banda 4 (TIR) em ND; e (b) é a composição RGB das bandas 1, 2 e 3.



Fonte: Própria autora.

O registro das imagens aéreas foi então realizado, conforme rotina sugerida pelo *PhotoScan* da empresa *Agisoft*, com a detecção automática de 73.224 pontos, que buscaram identificar as características comuns capturadas em diferentes cenas. Entretanto, o *software* não conseguiu identificar pontos suficientes no canal principal do corpo d'água. Isso ocorre devido à homogeneidade da imagem, que, apesar de se tratar de uma imagem RGB, não apresenta feições bem definidas.

Com isso, gerou-se um mosaico não-georreferenciado (Figura 5.15) em formato TIFF, com resolução de 2,44 cm/pixel e tamanho, em pixel, de 1.080x4.096. Os pixels do canal principal do rio Paraíba do Sul receberam valores 0 (NoData), mantendo apenas as margens dos rios com valores superiores a 0, impossibilitando, assim, a estimativa da temperatura da superfície da água através deste produto.

Figura 5.15 - Mosaico gerado do processamento das imagens de quatro bandas espectrais no *software PhotoScan*, em que (a) é o mosaico TIR e (b) a composição colorida RGB das bandas 1, 2 e 3.



Fonte: Própria autora.

Vale salientar que esta mesma técnica foi utilizada para o processamento de imagens aéreas, obtidas em um setor da Universidade do Vale do Paraíba, localizada na divisa entre os municípios de São José dos Campos e Jacareí, sendo que a etapa de fusão de imagem permitiu o processamento das imagens

termais obtidas a bordo de VANT, resolvendo as limitações dos produtos oriundos das câmeras disponíveis no mercado. Os resultados consistentes desta análise experimental foram publicados no XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SAMPAIO et al., 2019).

Entretanto, em função dos resultados obtidos neste estudo, optou-se por não utilizar o mosaico como referência para o algoritmo de estimativa de temperatura da superfície terrestre, bem como na detecção de mudanças de temperatura que ocorreram ao longo do leito principal do rio. Diante disso, visando utilizar a técnica de registro automática de imagens para o processamento das imagens termiais capturadas pela câmera FLIR Duo, foram testados os algoritmos SIFT, para a extração de pontos homólogos e seus descritores, e RANSAC, para o descarte de *outliers*.

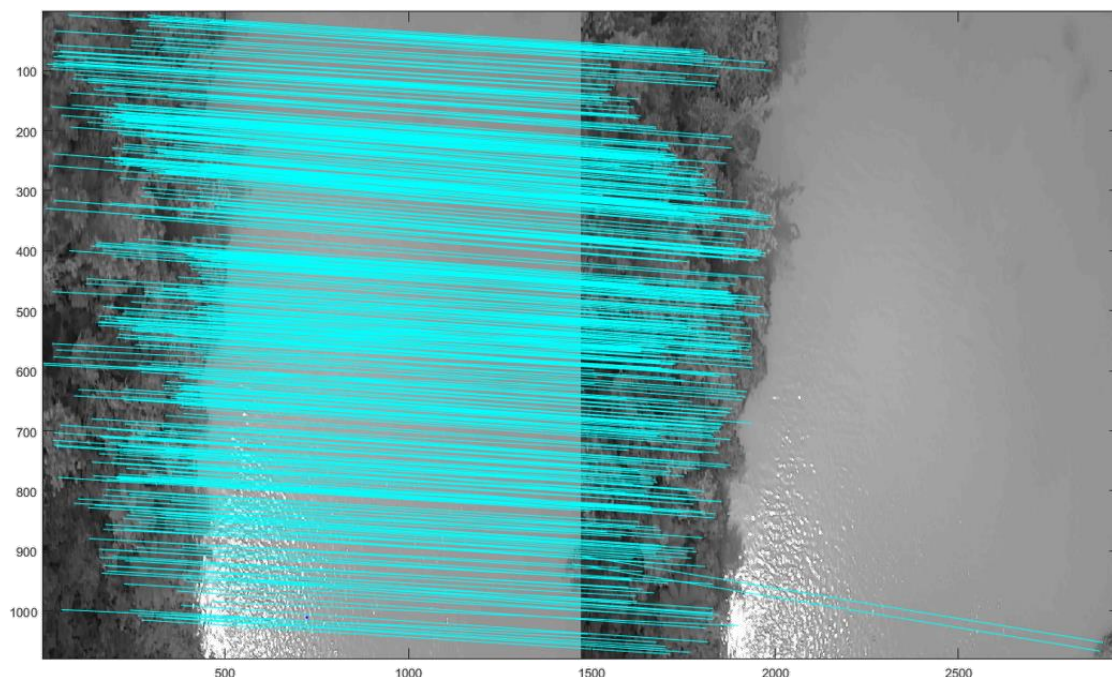
As imagens TIR e RGB foram trabalhadas separadamente em pares de imagens consecutivas, onde a imagem 1 foi adquirida no tempo  $t$  e a imagem 2 adquirida em  $t+1s$ . Ao testar os 180 pares possíveis de imagens, menos de 80 delas não apresentaram distorções significativas após casamento (*match*) das cenas.

Na maioria dos casos, os pontos identificados como homólogos localizavam-se às margens do leito do rio Paraíba do Sul. Quando a vegetação das margens não era significativa nas cenas, foram identificados menos pontos homólogos do que o necessário para a resolução da matriz de homografia. Isso acabou impossibilitando a correção dos parâmetros de orientação exterior e interior das imagens e, conseqüentemente a geração de um mosaico.

Na Figura 5.16, é representado outro erro identificado ao longo do processamento das imagens aéreas através deste método. A figura demonstra que os pontos homólogos identificados não se encontram bem distribuídos na cena e, por isso, uma imagem é corrigida erroneamente.



Figura 5.16 - Exemplo de pontos homólogos mal distribuídos identificados em duas cenas consecutivas.



Fonte: Própria autora.

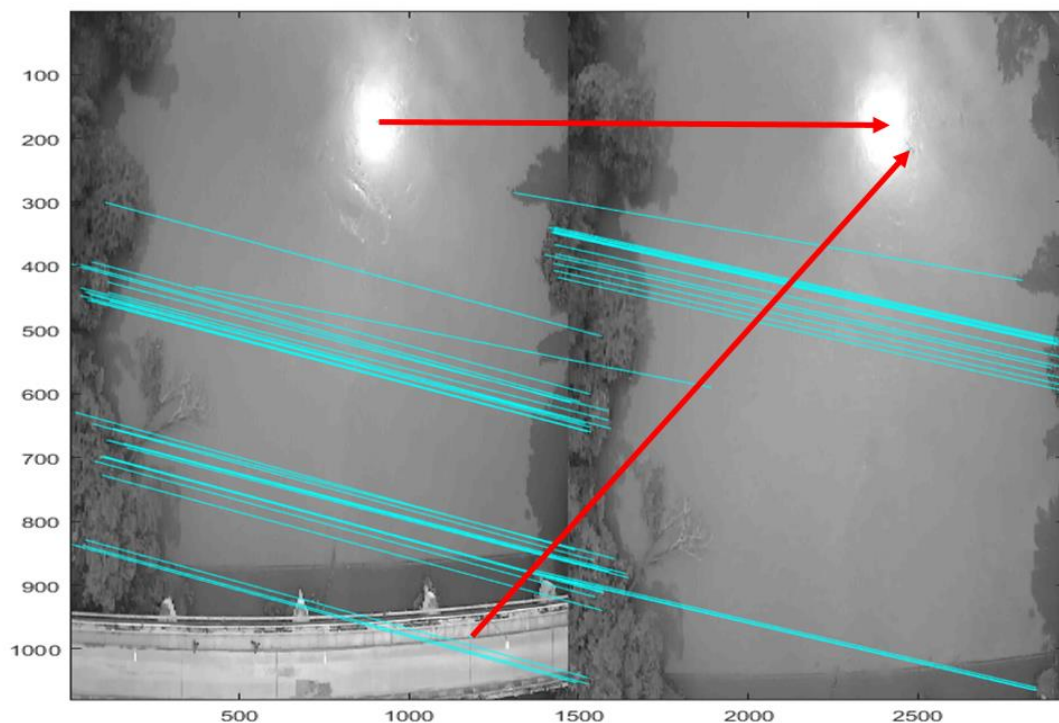
Outro problema enfrentado pelo método direto de identificação dos pontos homólogos é a variação de luminosidade entre as cenas. Muitas vezes a reflexão especular da luz solar direta (*sun glint*) acaba sendo reconhecida como ponto-chave na combinação de duas imagens. Devido ao baixo sinal proveniente do corpo d'água, a interferência de fatores ambientais no processo de aquisição das imagens é agravada (BARBOSA; NOVO; MARTINS, 2019). Dessa forma, a cobertura de nuvens, reflexão especular da luz solar ou do céu, presença de vento e o sombreamento causado pela vegetação ripária são os grandes responsáveis pela variabilidade nas medições.

Segundo Lima (2018) os algoritmos de reconhecimento de padrões, mesmo quando utilizados em áreas urbanas com feições bem definidas, como limite dos telhados, rodovias, faixa de pedestres e outros, ainda apresentam erros de identificação de pontos homólogos. Mesmo utilizando o RANSAC, alguns casamentos incorretos não foram selecionados como outliers e, por isso, não foram retirados, o que acarretou numa piora na acurácia posicional do produto gerado.

A Figura 5.17 apresenta um exemplo de detecção de pontos homólogos em duas cenas subsequentes. Apesar da inconsistência de algumas características identificadas na imagem (indicada com uma seta vermelha), foram identificadas 1.868 características em duas imagens analisadas a partir da aplicação do algoritmo SIFT. Nestas, foram encontrados 658 casamentos entre estas características, das quais somente 53 *matches* foram utilizados para a realização do registro automático destas imagens. A grande diferença entre os pontos homólogos encontrados e aqueles utilizados deve-se à retirada de outliers (falsos casamentos) realizado pela aplicação do algoritmo RANSAC.

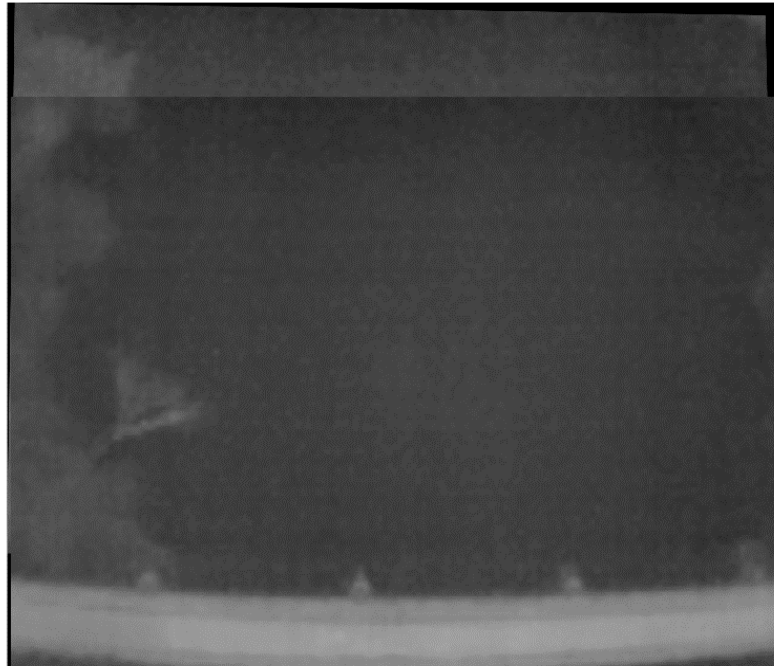
Desta interação, foi gerado um mosaico RGB e um mosaico TIR (Figura 5.18). O mosaico RGB foi ainda utilizado para identificar novos pontos homólogos em uma terceira imagem (Figura 5.19), que resultou em um novo mosaico, agora composto por três imagens (Figura 5.20).

Figura 5.17 - Pontos homólogos identificados a partir da execução dos algoritmos SIFT e RANSAC combinados.



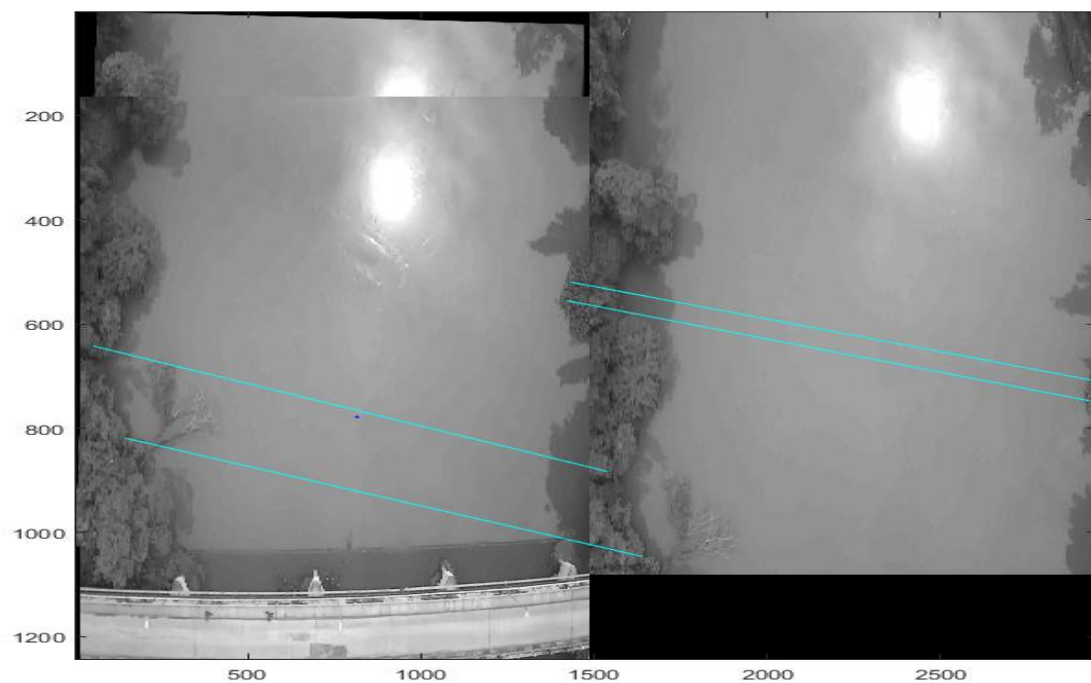
Fonte: Própria autora.

Figura 5.18 - Mosaico termal gerado a partir de duas imagens TIR aéreas consecutivas por meio da combinação dos algoritmos SIFT e RANSAC.



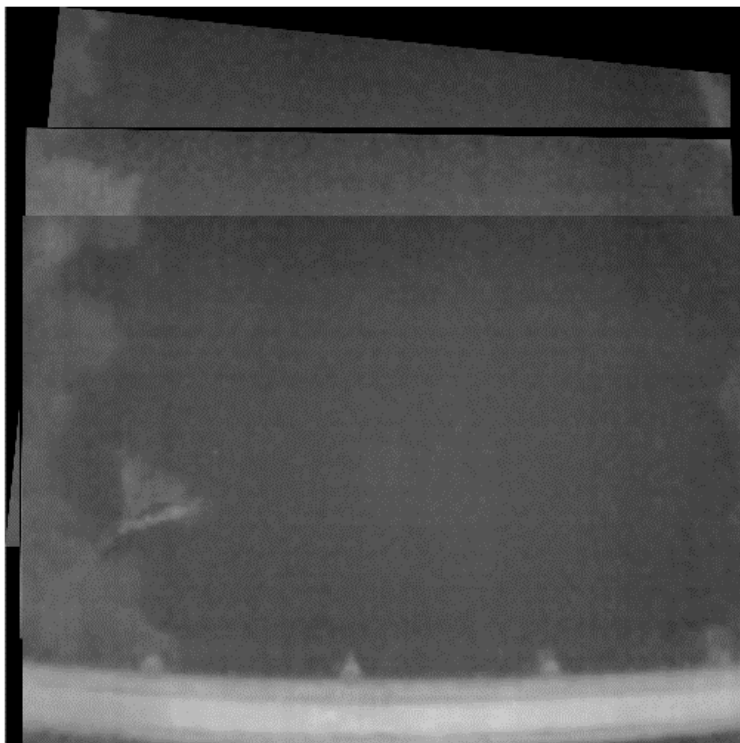
Fonte: Própria autora.

Figura 5.19 - Pontos homólogos identificados entre um mosaico gerado de duas imagens RGB e uma nova imagem.



Fonte: Própria autora.

Figura 5.20 - Mosaico termal gerado a partir de três imagens TIR aéreas consecutivas por meio da combinação dos algoritmos SIFT e RANSAC.



Fonte: Própria autora.

Este método mostrou-se capaz de, atendidas as restrições e condições para o registro automático das imagens, gerar um mosaico das imagens aéreas obtidas com a câmera FLIR Duo. Entretanto, o mosaico gerado ainda apresenta distorções que prejudicam a precisão na determinação da temperatura da superfície do corpo hídrico.

Após os testes das metodologias para o processamento das imagens aéreas termais, foi possível traçar algumas estratégias que podem ser adotadas para a obtenção de resultados mais precisos.

O aumento da porcentagem de sobreposição longitudinal e vertical entre as imagens (como, por exemplo, voos cruzados) favorece a identificação de mais pontos-chave por cena (FERREIRA et al., 2013). Entretanto, quanto maior a sobreposição, maior o número de imagens aéreas, o que torna o processamento oneroso em termos de espaço e tempo, bem como ferramentas computacionais (LUZ, 2015).

Assim, outra proposta é extrapolar os limites do curso d'água a fim de obter uma área maior de vegetação, ou outra classe que apresente feições bem definidas, para facilitar o processo de perfilamento de pontos homólogos. Com isso, também será possível implantar no terreno às margens do corpo hídrico, pontos de controle bem espaçados para a criação de novas características às imagens (OLIVEIRA, 2017; FERREIRA, 2014; ZANETTI, 2017).

A abordagem proposta por Silva N. (2018) que pode melhorar a performance do registro automático de imagens é a utilização de um sensor RTK – um sistema GNSS de maior precisão – para a aquisição de informações a respeito do posicionamento do VANT ao longo de sua trajetória de voo. Essas informações podem, então, ser relacionadas ao horário de aquisição de cada imagem aérea.

Além disso, as imagens aéreas termais, quando adquiridas após o período de intensa radiação solar, apresentam maior diferenciação de temperatura entre os materiais. Dessa forma, o voo realizado ao final da tarde e início da noite pode favorecer a extração de pontos característicos em imagens termais e, conseqüentemente, podem proporcionar a geração de um mosaico mais preciso (SILVA N., 2018).

### **5.5 Análise dos padrões de temperatura da superfície da água**

Em campo, foram obtidas 10 medidas de temperatura da superfície da água, sendo que as mesmas variaram de 22° C a 24° C de acordo com a posição geográfica. Porém, devido à baixa acurácia do receptor GNSS utilizado para obter as coordenadas geográficas de cada ponto e às imagens aéreas que, mesmo após o processamento, não apresentarem informações quanto sua posição no espaço, não foi possível utilizar um único pixel para a validação da temperatura superficial da água.

Além disso, o problema de se aplicar o método de estimativa de temperatura para uma única região é que o resultado obtido será diferente dependendo da cena escolhida para a análise (SILVA N., 2018). Assim, os resultados obtidos para a temperatura da superfície da água podem não representar os resultados que seriam obtidos ao longo do canal principal do corpo hídrico.

Por esse motivo, foram consideradas duas diferentes regiões do canal principal do rio Paraíba do Sul com o objetivo de espacializar ao máximo os resultados e, conseqüentemente, obter resultados mais fiéis àqueles encontrados em campo, conforme pode ser observado na Figura 5.21.

Figura 5.21 - Espacialização das áreas escolhidas para a análise dos padrões de temperatura do canal principal do rio Paraíba do Sul, bem como os dados de temperatura obtidos em campo.



Fonte: Própria autora.

### 5.5.1 Área 1: lançamento de efluente

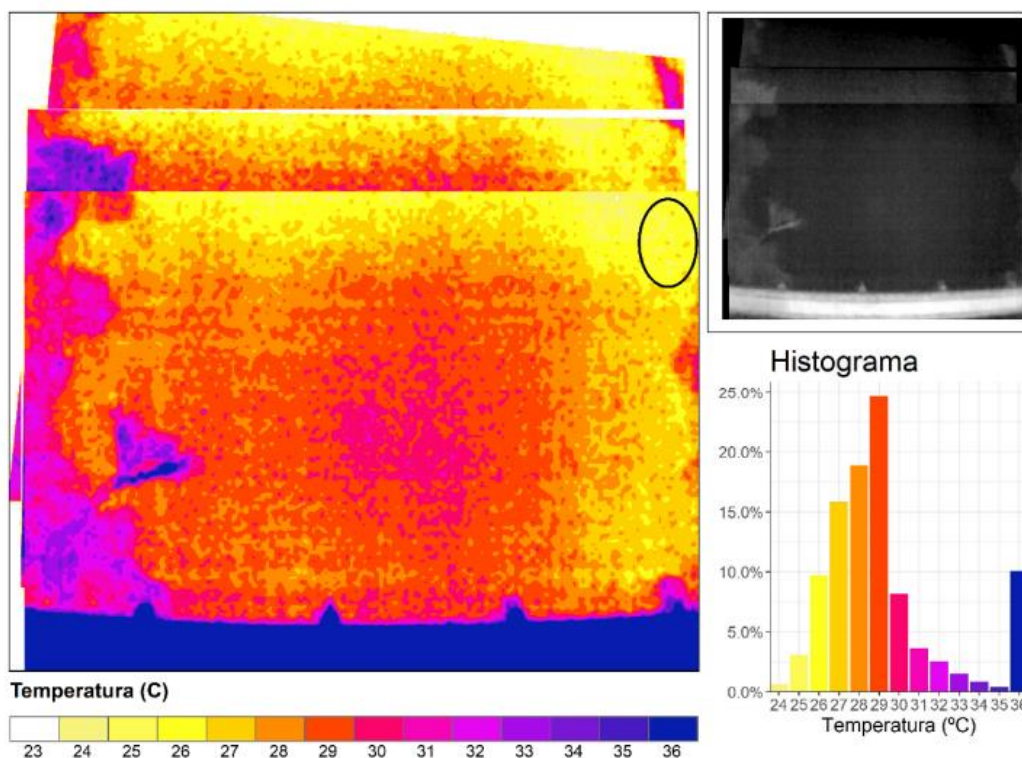
A primeira análise realizada refere-se aos valores de temperatura aparente obtidos através da equação que converte valores de ND em temperatura (°C), para uma imagem localizada em uma área que se encontra próxima ao lançamento de efluentes.

Um Corpo Cinza emite radiação eletromagnética de maneira constante ao longo de todo o espectro e, por isso, possui uma emissividade constante sempre inferior a 1.

Na Figura 5.22 observa-se a temperatura (°C) estimada para cada pixel do mosaico por meio da Equação 2.27, que relaciona o ND na imagem termal e a temperatura de um corpo real. Para isso, assumiu-se que os objetos em cena emitem radiação eletromagnética constante ao longo dos comprimentos de onda de 7,2 a 14  $\mu\text{m}$ , sendo adotado:  $\epsilon_{\text{concreto}} = 0,97$ ,  $\epsilon_{\text{vegetação}} = 0,96$  e  $\epsilon_{\text{água}} = 0,98$  (SEVERINO, 2006; ALMEIDA, 2011; VALOR; CASELLES, 1996).

Os valores de temperatura calculados variam entre 24° C e 36° C, sendo essa diferença facilmente associada aos elementos presentes na cena: vegetação, ponte e corpo hídrico. Isso permite a identificação e diferenciação entre estas classes.

Figura 5.22 - Estimativa da temperatura (°C) da superfície da água do rio Paraíba do Sul na Área 1, próxima ao lançamento de um efluente ao canal principal do corpo hídrico.



Fonte: Própria autora.

A ponte, que ocupa 10% da imagem, apresenta as temperaturas mais elevadas, próximo à 36 °C. Isso ocorre em virtude de o concreto possuir uma alta capacidade de absorção e armazenamento térmico, o que faz com que o calor que é irradiado fique concentrado, resultando em um aumento na temperatura da superfície (DELGADO et al., 2012; MOREIRA; NÓBREGA, 2011; PAVÃO et al., 2015).

A vegetação localizada às margens do rio Paraíba do Sul apresenta valores de temperatura que variam entre 30 °C e 35 °C. Em ambientes com grande densidade de vegetação, boa parte da radiação eletromagnética incidente é absorvida e é utilizada para os processos fotossintéticos. Dessa forma, esta classe acaba irradiando menos calor (MASHIKI, 2012; PEREIRA et al., 2016; SILVA et al., 2018).

O corpo hídrico apresentou valores inferiores de temperatura quando comparados aos de outras classes, porém superiores se comparados à temperatura obtida em campo para aquela região, que foi de 22 °C. Conforme especificações da câmera FLIR Duo, o sensor infravermelho termal possui uma exatidão de 5 °C ou 5%. A acurácia da câmera foi melhorada a partir do ajuste da equação de conversão radiométrica obtida por meio da caracterização realizada em laboratório. Apesar disso, os valores da temperatura cinética da superfície da água obtidos por meio do sensoriamento remoto com relação à medição realizada em campo foram discrepantes.

As temperaturas da água também variam bastante ao longo da extensão do corpo hídrico. Próximo às margens, foram obtidas as menores temperaturas, em torno de 26° C e 27° C, enquanto temperaturas mais elevadas foram observadas no centro do canal principal (28 °C a 30 °C). Alguns estudos demonstram que a presença de um dossel de vegetação à margem acrescenta um efeito de sombra, diminuindo a exposição da água à radiação solar e, conseqüentemente, as temperaturas da superfície da água tendem a ser menores do que aquelas do canal principal (FANTIN-CRUZ et al., 2010; PERCEBON et al., 2005). Além disso, a turbulência da água no canal do rio promove a redistribuição de calor no

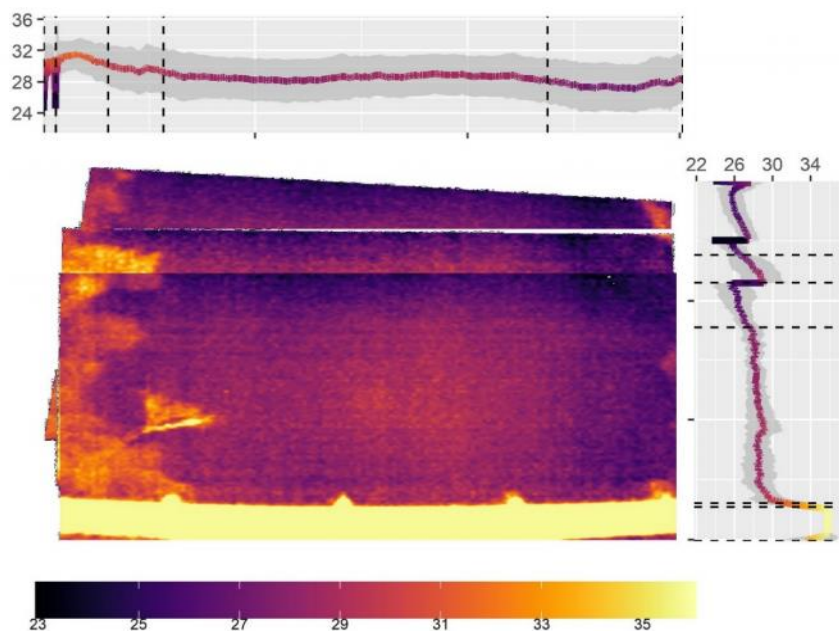


mesmo, resultando nestas diferenças de temperatura (FERREIRA; CUNHA, 2013).

Entretanto, essa diferença observada não necessariamente pode ser atribuída a uma variabilidade espacial natural do corpo hídrico, já que toda a borda da imagem reproduz valores inferiores ao centro dela. Isso significa que a imagem apresenta uma distorção radial que está diretamente associada à lente do sistema sensor termal. Dessa forma, ao utilizar o centro das imagens termais para compor o mosaico, cada vez mais distorção era acrescida à cena e, conseqüentemente, menos precisa era a estimativa da temperatura da superfície da água.

Essa característica da imagem termal pode ser muito bem observada ao analisar as faixas de temperaturas identificadas na cena. No sentido transversal, que representa a variação que ocorre de margem a margem do rio, foram identificadas cinco faixas de temperaturas, enquanto no sentido longitudinal, da jusante à montante do corpo de água, foram identificadas seis faixas de temperatura. A Figura 5.23 apresenta as faixas identificadas em ambos os sentidos.

Figura 5.23 - Pontos de mudança da temperatura identificados na cena referente a Área 1 desta análise de padrão de temperatura.



Fonte: Própria autora.

Ao analisar as faixas transversais, é possível relacioná-las, da esquerda para a direita: ao casamento da imagem na geração do mosaico; à temperatura da vegetação localizada à margem do corpo d'água; à área do canal sobre influência da margem, cuja vegetação ainda afeta a temperatura do canal; ao canal principal do rio, onde a temperatura da superfície da água não variou significativamente, mantendo-se em torno de 28° C; e à área que apresenta temperatura mais baixa devido à sombra gerada pela vegetação na margem, bem como o ruído característico da imagem.

No perfil longitudinal do rio, os pontos de mudança de temperatura deveriam detectar fluxos ao longo do canal principal com diferentes temperaturas. Porém, as faixas podem ser explicadas, da montante à jusante (de baixo para cima), pela maior temperatura na cena associada à ponte; à área sob influência da ponte, cuja presença causou um aumento da temperatura de modo geral; ao canal principal do corpo hídrico, cuja temperatura também não apresentou grandes diferenças, com valores que variam entre 28° C e 30° C; e, por fim, todas as outras faixas causadas pela distorção radial na cena, devido a lente da câmera.

A degradação da imagem influenciou a capacidade de detectar diferenças de temperaturas, já que mudanças de temperaturas inexistentes no corpo hídrico são causadas pelo ruído e pela baixa resolução espacial, o que dificulta a obtenção de pixels puros na imagem. Fricke e Baschek (2015) assumem que a capacidade de detectar fluxos com diferentes temperaturas diminui com a degradação da resolução espacial, levando à identificação de um número maior de pontos de mudança. Segundo Dugale (2016), esses erros são ainda maiores quando a aquisição das imagens termais é realizada por meio de câmeras que utilizam microbolômetros não resfriados, como é o caso da FLIR Duo. A detecção errônea é induzida pelas mudanças nos valores de ND gravados em imagens capturadas sucessivamente.

Dessa forma, os pontos de mudança detectados não estão relacionados às mudanças de temperatura que ocorrem no canal principal do rio Paraíba do Sul e sim às mudanças de classe na cena e também às características da imagem

relacionadas ao sistema sensor termal. Por isso, caso alterações tenham ocorrido na temperatura da superfície da água, elas não foram identificadas separadamente, já que estas sutis variações não foram significativas a ponto de serem detectadas.

### 5.5.2 Área 2: fluxo com diferente temperatura e coloração

Esta segunda análise refere-se a uma área, representada por um mosaico composto de duas imagens, cujas manchas de um fluxo (correnteza) foram identificadas através de uma análise visual das imagens RGB (Figura 5.24). Em campo, tal alteração na coloração da água não foi possível identificar, e por isso, não é possível determinar a origem de tais fluxos.

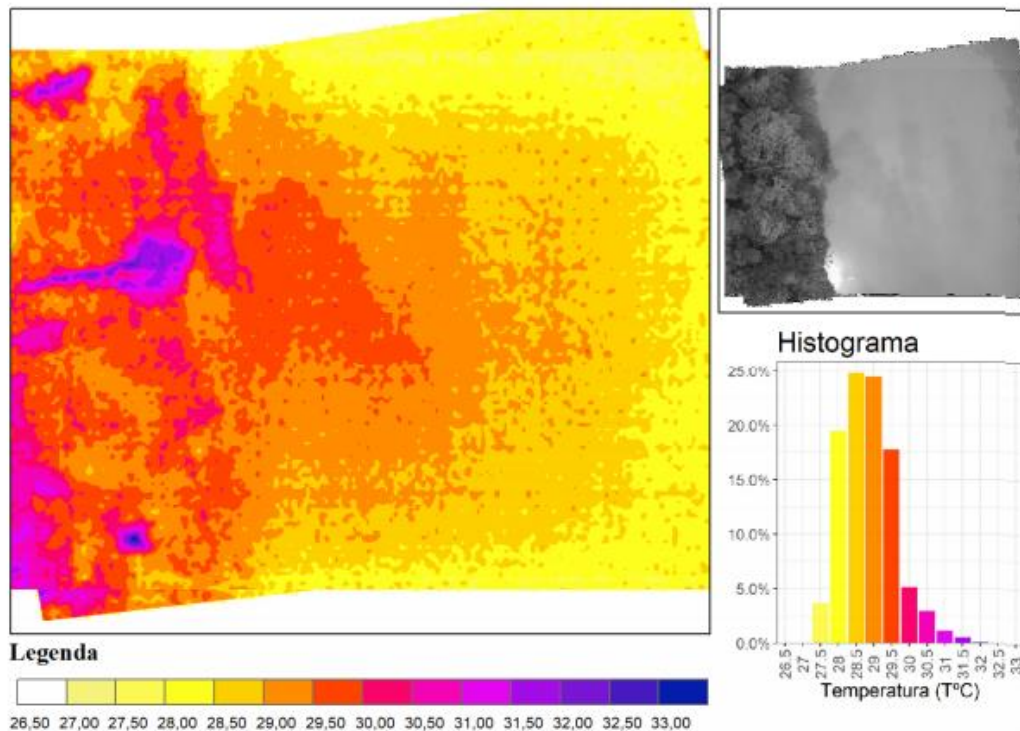
Figura 5.24 - Imagem RGB utilizada na identificação visual de diferentes fluxos (correntezas) ao longo do canal principal do rio Paraíba do Sul.



Fonte: Própria autora.

Na Figura 5.25, é possível observar a temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ) estimada para cada pixel do mosaico, sendo que estes valores variam entre  $26,50^{\circ}\text{C}$  e  $33^{\circ}\text{C}$ . Nesse caso, a diferença entre as temperaturas é explicada pela presença de mais de um fluxo no trecho do canal do rio Paraíba do Sul.

Figura 5.25 - Estimativa da temperatura (° C) da superfície da água do rio Paraíba do Sul na Área 2, onde percebe-se a existência de um fluxo de água com coloração e temperatura diferente da correnteza do rio.



Fonte: Própria autora.

O corpo hídrico apresentou os maiores valores próximo às margens (29,50 °C), não só pela presença da resposta da vegetação nos pixels, mas também pela presença de um fluxo mais quente que também pode ser observado na imagem RGB. Ao se afastar das margens, a temperatura superficial da água foi diminuindo devido à redistribuição do calor no canal principal do rio. Além disso, os menores valores de temperatura, aqueles entre 27 °C e 28 °C, já são resultados do ruído da imagem termal.

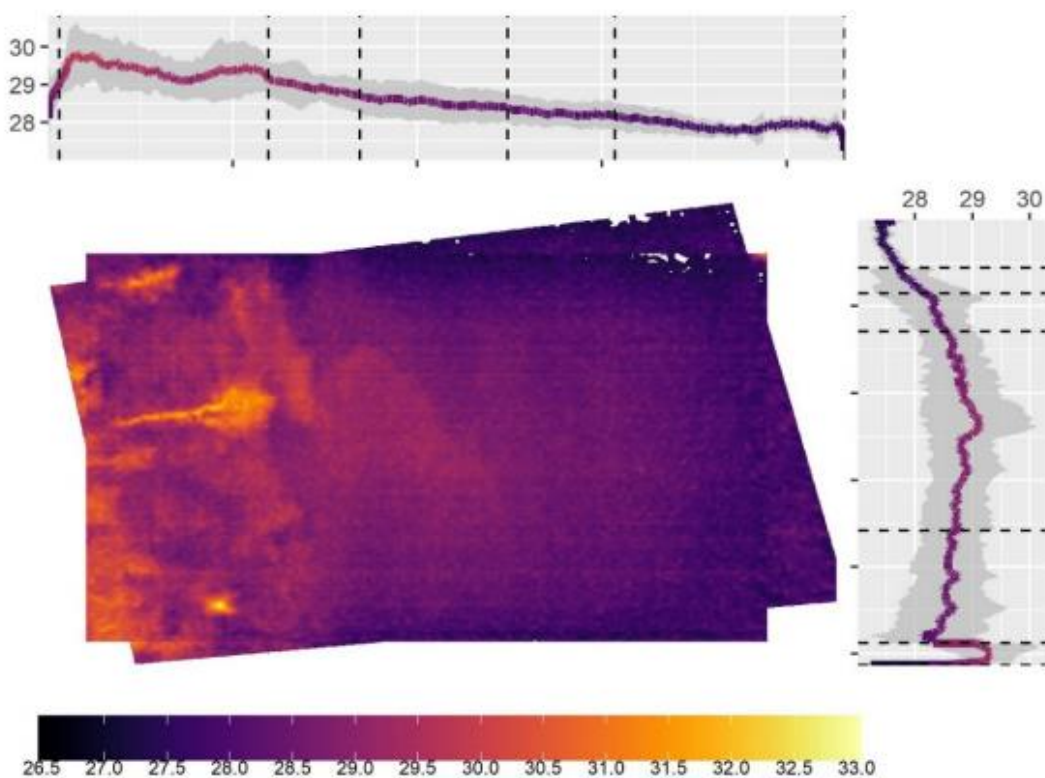
De forma geral, a temperatura da água tende a ser maior durante o verão, devido à proximidade entre as temperaturas da água e do ambiente (SILVA, 2008). Entretanto, os maiores valores de temperatura podem estar associados a pontos onde há despejo de esgoto. O aumento da temperatura do corpo hídrico sugere uma maior concentração de matéria orgânica na água e, conseqüentemente,

maior atividade metabólica realizada pelos microorganismos (DUCCINI et al., 2006; ROSA, 2012).

Lopes et al. (2011) determinaram valores críticos de temperatura para uma seção do rio Paraíba do Sul próxima à captação de água da indústria Heineken, em Jacareí. De acordo com os autores, a temperatura variou entre 18° C e 28° C ao longo dos meses analisados no ano de 2006, sendo que a temperatura média encontrada para este conjunto de dados foi de 23,1° C.

As faixas de temperatura identificadas no mosaico termal da segunda região estudada são apresentadas na Figura 5.26.

Figura 5.26 - Pontos de mudança de temperatura identificados na cena referente a Área 2 desta análise de padrão de temperatura da superfície da água no rio Paraíba do Sul.



Fonte: Própria autora.

No sentido transversal, ou seja, na largura do corpo hídrico, foram identificadas seis faixas com diferentes temperaturas, sendo pelo menos três delas referentes às variações de temperatura entre os fluxos d'água na cena, enquanto no sentido

longitudinal as seis classes identificadas estão associadas às características do sistema sensor termal utilizado.

As faixas detectadas podem ser analisadas, da esquerda para a direita: ao casamento da imagem; a maior temperatura de superfície devido à influência da vegetação localizada à margem esquerda da cena; ao fluxo identificado que corre paralelamente a correnteza natural do rio, com uma temperatura superior ao restante da encontrada no rio ( $\sim 29^\circ \text{C}$ ); à influência do fluxo de maior temperatura sobre o canal principal do corpo d'água ( $\sim 28,50^\circ \text{C}$ ); à temperatura natural do corpo hídrico no período, que se manteve em torno de  $28^\circ \text{C}$ ; e, por fim, ao ruído característico da imagem.

Apesar da pouca diferença entre as temperaturas de superfície da água, a ausência de outras classes na cena possibilitou a identificação de sutis variações e, conseqüentemente, a detecção de fluxos com diferentes temperaturas. Em corpos hídricos de grande porte, como é o caso do rio Paraíba do Sul, a heterogeneidade da temperatura é muito mais explicada pela contribuição de afluentes de diversas fontes ao canal principal do rio do que a radiação solar em si (CARDENAS et al., 2014; DUGDALE, 2016).

## 6 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A etapa de caracterização da câmera FLIR Duo, realizada em laboratório antes da integração ao VANT, foi essencial para a determinação da real capacidade e limitação do sistema sensor termal utilizado neste estudo, principalmente porque as informações fornecidas pelo fabricante da câmera eram imprecisas.

A partir da análise radiométrica, por exemplo, foi possível estimar uma equação de conversão que melhor ajusta os valores de ND da imagem à emitância e, conseqüentemente, temperatura cinética do corpo terrestre ( $^{\circ}$  C). Com isso, melhorou-se a acurácia da câmera infravermelho termal, que em valores mais baixos de temperatura apresentavam erros superiores a  $15^{\circ}$  C.

Nessa dissertação propõe-se ainda uma solução para o processamento de imagens infravermelho termais, principalmente na etapa de identificação de pontos homólogos, já que a baixa resolução espacial e a homogeneidade da imagem dificultam seu manuseio e interpretação. Foram descritos métodos baseados no registro automático de imagens, bem como apresentados detalhes da implementação de ambos. O *stacking* de imagens para utilização de *softwares* semiautomáticos, apesar de apresentar resultados consistentes para imagens de aéreas urbanas, não possibilitou a geração de um mosaico da seção do rio Paraíba do Sul e, conseqüentemente, não pode ser utilizado para estimar a temperatura da superfície da água. Por outro lado, a metodologia firmada na identificação de características nas imagens através da utilização, em conjunto, dos algoritmos SIFT e RANSAC mostrou-se capaz, salvo algumas restrições e condições encontradas, de produzir um mosaico com as imagens aéreas obtidas com a câmera TIR de baixo custo.

Apesar de possibilitar a geração de um mosaico, algumas técnicas e abordagens também podem ser adotadas para a obtenção de resultados mais precisos, como: o aumento da sobreposição das imagens aéreas; a utilização de pontos de controle às margens dos corpos hídricos; o georreferenciamento das imagens por meio do casamento do posicionamento do VANT no horário de captura da imagem; dentre outras. O objetivo inicial do processamento das imagens aéreas termais era gerar um único mosaico de toda a seção estudada do rio Paraíba do

Sul. Assim, a utilização de várias regiões para a estimativa da temperatura do rio representaria melhor os resultados que seriam obtidos ao longo de todo o canal principal do corpo hídrico, bem como a variabilidade espacial da temperatura a descargas de afluentes e efluentes industriais. Entretanto, devido a característica da lente de sistema sensor termal da câmera FLIR Duo, a imagem TIR apresentou grandes distorções em suas bordas. Dessa forma, ao acrescentar novas imagens a um mosaico, era acrescida cada vez mais distorção à cena, prejudicando a aquisição dos valores de temperatura.

Por esse motivo foram consideradas duas regiões diferentes da área de estudo, representadas por mosaicos compostos por poucas imagens, a fim de espacializar ao máximo os resultados e, conseqüentemente, obter resultados mais fiéis àqueles encontrados em campo. As seções do rio estudadas apresentavam contribuições de efluentes ou fluxos com diferente coloração, identificados em campo e em imagens RGB.

Ao analisar as faixas transversais de temperatura da superfície da água foram encontrados dois cenários diferentes de acordo com a região estudada. Na Área 1, as diferenças de temperaturas detectadas são facilmente associadas às classes de vegetação, construção (ponte) e corpo d'água. Por isso, caso alguma alteração na superfície da água tenha ocorrido a mesma não foi identificada. Entretanto, no caso da Área 2, apesar de não conseguir quantificar a precisão das estimativas de temperatura da superfície da água, a ausência de outras classes à cena possibilitou identificações de sutis variações e, conseqüentemente, a detecção de fluxos com diferentes temperaturas.

As faixas longitudinais, por outro lado, para as duas áreas estudadas, referem-se às características do sistema sensor termal. A característica da lente do sensor termal da câmera e a baixa resolução espacial (pixels misturados) da imagem influenciam diretamente a detecção errônea de mudanças de temperatura na superfície da água. Por isso, é imprescindível a aplicação de métodos de suavização, como filtros, a fim de se evitar falsas detecções.

Este estudo sugere o potencial eminente do uso de câmeras operando no infravermelho termal a bordo de VANTs para uma melhor compreensão do



monitoramento da temperatura da superfície da água e sua importante implicação para o manejo dos ecossistemas aquáticos, apesar de ainda se constituir num desafio devido aos recursos disponíveis.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACTON RESEARCH CORPORATIONS. **Spectrapro-2500i: operating instructions**. Acton, MA, 2003.
- ALEXANDER, D. M.; MACQUARRIE, K. T. B.; CAISSIE, D.; BUTLER, K. E. The thermal regime of shallow groundwater and small Atlantic salmon stream bordering a clearcut with a forested streamside buffer. **Annual Conference of Canadian Society for Civil Engineering**, Moncton, 2003.
- ALMEIDA, I. D. C. **Estudo sobre o uso de veículo aéreo não tripulado (VANT) para mapeamento aéreo com fins de elaboração de projetos viários**. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2014.
- ALMEIDA, P. H. S. **Avaliação de métodos de mosaico de imagens aplicados em imagens agrícolas obtidas por meio de RPA**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Agrícolas) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2018.
- ALVARENGA, L. A.; MARTINS, M. P. P.; CUARTAS, L. A.; PENTEADO, V. A.; ANDRADE, A. Estudo da qualidade e quantidade de água em microbacia, afluente do rio Paraíba do Sul - São Paulo, após ações de preservação ambiental. **Ambi-Água**. Taubaté, v. 7, n. 3, p. 228-240, 2012.
- ALVES JR., L. R.; CÔRTEZ, J. B. R.; FERREIRA, M. E. Validação de mosaicos aerofotogramétricos utilizando fotografias obtidas com câmera digital não métrica acoplada a um VANT. In Congresso Brasileiro de Cartografia (CBC), 26. **Anais...** Gramado, 2014. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0436.pdf>>. Acesso em 24 de janeiro de 2018.
- ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998.
- ANDRADE, L. L. **Estimativa de temperatura e emissividade com imagens do sensor HSS (Hyperspectral Scanner System) e suas relações com materiais urbanos**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011.
- ANGELOCCI, L. R.; VILLA NOVA, N. A. Variações da temperatura da água de um pequeno lago artificial ao longo de um ano em Piracicaba - SP. **Sci. Agric.** Piracicaba, v. 52, n. 3, p. 431-438, 1995.
- ANTONELLI, M.; KLAUS, J.; SMETTEM, K.; TEULING, A. J.; PFISTER, L. Exploring streamwater mixing dynamics via handheld thermal infrared imagery. **Water**, v. 9, n. 358, 2017. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2073-4441/9/5/358>>. Acesso em 02 de setembro de 2019.

AUGER, I. E.; LAWRENCE, C. E. Algorithms for the optimal identification of segment neighborhoods. **Bulletin of Mathematical Biology**, v. 51, n.1, p. 39-54, 1989.

BARBARINI, E. S. **Análise óptica de sistemas eletro-ópticos por meio do cálculo da função de transferência de modulação**. Dissertação (Mestrado em Ciências pelo Programa de Engenharia Elétrica) – Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

BARBOSA, C. C. F.; NOVO, E. M. L. M.; MARTINS, V. S. **Introdução ao Sensoriamento Remoto de sistemas aquáticos**. 1ª edição. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 161 p. 2019.

BARBOSA, B. J. B. L.; PEREIRA, T. S. **Geração de base cartográfica para área de interesse histórico/cultural por meio de levantamento fotogramétrico adquirido com VANT (RPAS)**. Dissertação (Graduação em Engenharia Cartográfica) - Instituto de Geociências - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

BELLVERT, J; ZARCO-TEJADA, P. J.; GIRONA, J.; FERERES, E. Mapping crop water stress index in a "Pinot-noir" vineyard: comparing ground measurements with thermal remote sensing imagery from an unmanned aerial vehicle. **Precision Agric.** New York, v. 15, p. 361-376, 2014.

BOREMAN, G. D. **Modulation transfer function in optical and electro-optical systems**. Bellingham: SPIE Press, 2001.

BOTTINO, F. **Estudo experimental e matemático de qualidade da água com base na ecologia fluvial de pequenas bacias: estudo de caso do rio Canha, Baixo Ribeira de Iguape, SP**. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

BRAGA, J. R. G. **Navegação autônoma de VANT por imagens LIDAR**. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

BRANDÃO, V. V. **Caracterização de vazões em compartimentos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul**. Dissertação (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

BRITO, J.; COELHO, L. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro: UERJ, 2007.

CAISSIE, D. The thermal regime of rivers: a review. **Freshwater Biology**, v. 51, p. 1389- 1406, 2006.

CARDENAS, M. B.; DOERING, M.; RIVAS, D. S.; GALDEANO, C.; NEILSON, B. T.; ROBINSON, C. T. Analysis of the temperature dynamics of proglacial

river using time-lapse thermal imaging and energy balance modeling. **Journal of Hydrology**, v. 519, p. 1963-1973, 2014.

CARVALHO, A. R.; SCHLITTER, F. H. M.; TORNISIELO, V. L. Relações da atividade agropecuária com parâmetros físicos químicos da água. **Química nova**, v. 23, n. 5, p. 618-622, 2000.

CASADO, F. D. C.; ETCHEBEHERE, M. L. C.; STEVAUX, J. C.; OLIVEIRA, P. E.; SAAD, A. R. Estratigrafia e paleoambiente neoquaternário da calha aluvial do rio Paraíba do sul entre os municípios de São José dos Campos e Taubaté. **Geociências**, v. 30, n. 2, p. 125-145, 2011.

CASTRO, A. P. A.; SILVA, J. D. S.; MEDEIROS, F. L. L.; SHIGUEMORI, E. H. Restauração de imagens e detecção automática de características aplicadas à Navegação Aérea Autônoma. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. **Anais...** Natal, 2009. Disponível em: <<http://marte.dpi.inpe.br/col/dpi.inpe.br/sbsr%4080/2008/11.17.22.49.50/doc/6813-6819.pdf>>. Acesso em 2 de maio de 2019.

CASTRO, S. G. **Análise espacial e temporal da precipitação, do material particulado e da radiação global em municípios paulistas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

CHERKAUER, K. A.; BURGESS, S. J.; HANDCOCK, R. N.; KAY, J. E.; KAMPF, S. K.; GILLESPIE, A. R. Assessing satellite-based and aircraft-based thermal infrared remote sensing for monitoring Pacific Northwest river temperature. **Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)**, v. 41, n. 5, p. 1149-1159, 2005.

CHRZANOWSKI, K. **Testing thermal imagers: practical guidebook**. Military University of Technology: Warsaw. 172 p. 2010.

CI SYSTEMS. **SR-800 extended area blackbody**. Simi Valley, 2004.

COELHO, I. A. **Avaliação da qualidade posicional de dados oriundos de VANT para mapeamento fotogramétrico aplicado em projetos rodoviários**. Projeto Cartográfico (Graduação em Engenharia Cartográfica) - Instituto de Geociências da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

COELHO, Y. L.; SALOMÃO, J. M.; KULITZ, H. R. Intelligent hand posture recognition system integrated to process control. **IEEE Latin America Transactions**, v. 15, n. 6, p. 1144-1153, 2017.

CONSTANZI, R. N.; DANIEL, L. A. Estudo de tratamento de efluentes de uma fábrica de papel para imprimir visando o reuso por flotação e sedimentação. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 7, p. 156-165, 2002.

CULBERTSON, C. W.; HUNTINGTON, T. G.; CALDWELL, J. M.; O'DONNELL, C. Evaluation of aerial thermal infrared remote sensing to identify groundwater-discharge zones in the Meduxnekeag River, Houlton, Maine. **US Geological Survey**, 2014.

DELGADO, R. C.; RODRIGUES, R. A.; FARIA, A. L. L.; PESSÔA, C. S.; DAHER, M. Uso do sensoriamento remoto na estimativa dos efeitos de ilhas de calor. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, n. 25, p. 69-80, 2012.

DERENNE, M. **Caracterização de um sistema imageador infravermelho termal através de suas resoluções espaciais e radiométrica**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

DEVIDE, A. C. P. **História ambiental do Vale do Paraíba. Revisão de literatura para qualificação** (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2013.

DJI - Dà-Jiāng Innovations Science and Technology Co. **MATRICE 600 PRO - User Manual**. 2018. Disponível em: <[https://dl.djicdn.com/downloads/m600%20pro/20180417/Matrice\\_600\\_Pro\\_User\\_Manual\\_v1.0\\_EN.pdf](https://dl.djicdn.com/downloads/m600%20pro/20180417/Matrice_600_Pro_User_Manual_v1.0_EN.pdf)>. Acesso em 15 de janeiro de 2019.

DOD - SECRETARY OF DEFENSE. **Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Roadmap**. Washington, 2003.

DUCCINI, C. S.; PÓVOA, I. C.; AQUINO-SILVA, M. R.; BASTOS, E. J. B. Avaliação da qualidade da água do rio Paraíba do Sul em São José dos Campos e Jacareí – SP. In.: X Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VI Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba. **Anais...** São José dos Campos, 2006. Disponível em: <[http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC\\_2007/trabalhos/bioogicas/inic/INICG00225\\_01O.pdf](http://www.inicepg.univap.br/cd/INIC_2007/trabalhos/bioogicas/inic/INICG00225_01O.pdf)>. Acesso em 29 de julho de 2019.

DUGDALE, S. J. A practitioner's guide to thermal infrared remote sensing of rivers and streams: recent advances, precautions and considerations. **WIRES Water**, v. 3, p. 251- 268, 2016.

EBERSOLE, J. L.; LISS, W. J.; FRISSELL, C. A. Relationship between stream temperature, thermal refugia and rainbow trout *Oncorhynchus mykiss* abundance in arid-land streams in the northwestern United States. **Ecology of Freshwater Fish**, v. 10, p. 1- 10, 2001.

EDMUND OPTICS. **Infrared (IR) longpass filters**. Disponível em:<<https://www.edmundoptics.com/f/infrared-ir-longpass-filters/14164/>>. Acesso em 11 de setembro de 2019.

ESCHBACH, D.; PIASNY, G.; SCHMITT, L.; PFISTER, L.; GRUSSENMEYER, P.; KOEHL, M.; SKUPINSKI, G.; SERRADJ, A. Thermal-infrared remote

sensing of surface water–groundwater exchanges in a restored anastomosing channel (Upper Rhine River, France). **Hydrological Processes**, v. 31, n. 5, p. 1113-1124, 2017.

FANTIN-CRUZ, I.; TONDATO, K. K.; MARQUES, D. M.; PEDROLLO, O. Regime térmico em águas correntes e sua importância na estrutura do habitat e na biologia de organismos aquáticos. **Caminhos de Geografia**, Uberlândia, v. 11, n. 36, p. 295-307, 2010.

FAUX, R. N.; LACHOWSKI, H.; MAUS, P. L.; TORGERSEN, C. E.; BOYD, M. S. New approaches for monitoring stream temperature: airborne thermal infrared remote sensing. Inventory and monitoring project report: integration of remote sensing, U.S **Department of Agriculture Forest Service Engineering Remote Sensing Applications Center**, San Dimas, 2001.

FERREIRA, A. M. R. **Avaliação de câmara de pequeno formato transportada por veículo aéreo não tripulado - VANT, para uso em aerolevantamentos**. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

FERREIRA, D. M.; CUNHA, C. Simulação numérica do comportamento térmico do reservatório do Rio Verde. **Revista Engenharia Sanitária**, v. 18, n. 1, p. 83-93, 2013.

FERREIRA, A. M. R.; ROIG, H. L.; MAROTTA, G. S.; MENEZES, P. H. B. J. Utilização de aeronaves remotamente pilotadas para extração de mosaico georreferenciado multiespectral e modelo digital de elevação de altíssima resolução espacial. In: XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2013. Disponível em: <<http://marte2.sid.inpe.br/rep/dpi.inpe.br/marte2/2013/05.29.00.37.47>>. Acesso em 10 de junho de 2019.

FISCHLER, M. A.; BOLLES, R. C. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. **Communications of the ACM**, v. 24, n. 6, p. 381-395, 1981.

FLIR SYSTEM. **FLIR Duo - User Guide**. 2017. Disponível em: <<https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/flir-duo-user-guide.pdf>>. Acesso em 20 janeiro 2018.

FRICKE, K.; BASCHEK, B. Temperature monitoring along the Rhine River based on airborne thermal infrared remote sensing: estimation of in situ water temperatures and inflow detection compared to artificial satellite data. **Journal of Applied Remote Sensing**, v. 9, 2015.

GALO, M. L. B. T.; VELINI, E. D.; TRINDADE, M. L. B.; SANTOS, S. C. A. Uso do sensoriamento remoto orbital no monitoramento da dispersão de macrófitas nos reservatórios do complexo Tietê. **Planta Daninha**, p. 7-20, 2002.

- GERKE, T. **Mineração de dados de imagens obtidas com aeronave remotamente pilotada para estimativa de produtividade do trigo.** Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa, 2017.
- GHOLIZADEH, M. H.; MELESSE, A. M.; REDDI, L. A comprehensive review on water quality parameters estimation using remote sensing techniques. **Sensors**, v. 16, n. 8, 2016.
- GHOSH, D.; KAABOUCHE, N. A survey on image mosaicing techniques. **International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)**, v. 2, n. 2, p. 365-369, 2013.
- GILLESPIE, A. R.; MATSUNAGA, T.; ROKUGAWA, S.; HOOK, S. J. A temperature and emissivity separation for Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) images. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1113-1126, 1998.
- GONÇALVES, F. M. **Bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul: avaliação integrada da qualidade das águas dos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo.** Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.
- GONZÁLES, G. L. G. **Aplicação da técnica SIFT para determinação de campos de deformações de materiais usando visão computacional.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Digital image processing.** 3 ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2006.
- GONZALEZ-DUGO, V.; ZARCO-TEJADA, P.; NICOLÁS, E.; NORTES, P. A.; ALARCÓN, J. J.; INTRIGLIOLO, D. S.; FERERES, E. Using high resolution UAV thermal imagery to assess the variability in the water status of five fruit tree species within a commercial orchard. **Precision Agriculture**, v. 14, n. 6, p. 660-678, 2013.
- GOSHTASBY, A. A. **2-D and 3-D image registration: for medical, remote sensing, and industrial applications.** Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2005.
- GREGORIO-HETEM, J.; JATENCO-PEREIRA, V. Radiação Eletromagnética. In: OLIVEIRA, C. M. D.; GREGORIO-HETEM, J.; JATENCO-PEREIRA, V. **Fundamentos de Astronomia.** IAG/USP, 2010.
- GRONDONA, A.; ROLIM, S. B. A. Separação de temperatura e emissividade a partir de imagens do infravermelho termal: análise de suas aplicações/restrições. **Bol. Ciênc. Geod.** Curitiba, v. 22, n. 1, p. 16-34, 2016.



HAMAGUCHI, M. **Análise do circuito de água em processo de fabricação de papel imprensa integrada com produção de pastas termomecânicas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

HANDCOCK, R. N.; TORGERSEN, C. E.; CHERKAUER, K. A.; GILLESPIE, A. R.; TOCKNER, K.; FAUX, R. N.; TAN, J. Thermal infrared remote sensing of water temperature in riverine landscapes. In: CARBONNEAU, P. E.; PIÉGAY, H. **Fluvial remote sensing for science and management.** 1st ed. John Wiley & Sons, Hoboken, 2012.

HENDRICKS, C. **Waste-water heat recovery system.** U. S. Patent, n. 7,849,530, 2010.

HENRIQUES, M. J.; MARNOTO, J.; SANTOS, A. Alguns pormenores sobre a produção de ortomosaicos. In: Conferência Nacional de Cartografia e Geodesia, 8. **Anais...** Lisboa, 2015. Disponível em: <[http://viiicncg.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/VIIICNCG/cncg2015\\_comunicao\\_49.pdf](http://viiicncg.ordemengenheiros.pt/fotos/editor2/VIIICNCG/cncg2015_comunicao_49.pdf)>. Acesso em 22 de fevereiro de 2018.

INSTITUO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, 2008.

INSTITUO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Censo Demográfico, 2010.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: an Earth Resource Perspective.** 2ª edição. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2007.

JUDSON TECHNOLOGIES LLC. **Mercury cadmium telluride detectors.** Montgomeryville, 2002.

KILLICK, R.; ECKLEY, I. A. Change point: An R package for change point analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 58, n. 3, p. 1-17, 2014.

KÖPPEN, W. Climatologia: comun estudio de los climas de la tierra. **Fondo de Cultura Econômica.** México. 479p, 1948.

KUENZER, C.; DECH, S. Theoretical Background of thermal infrared remote sensing. In: KUENZER, C.; DECH, S. **Thermal infrared remote sensing: sensors, methods, applications.** Springer, 2013.

LI, Z-L; BECKER, F.; STOLL, M. P.; WAN, Z. Evaluation of six methods for extracting relative emissivity spectra from thermal infrared images. **Remote sensing of Environment**, v. 69, n. 3, p. 197-214, 1999.

LILLESAND, T. M. KIEFER, R. W. **Remote sensing and image interpretation.** 3 rd ed. John Wiley & Sons, Hoboken, 1994.

LIMA, S. A. **Avaliação da acurácia do posicionamento e orientação de aeronaves remotamente pilotadas com uso de técnicas de fotogrametria e processamento digital de imagens.** Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

LIMA FILHO, G. M. **Metodologia de caracterização de sistema eletro-óptico imageador termal para missões de busca e patrulha marítima.** Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2015.

LONGHITANO, G. A. **VANTs para sensoriamento remoto: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transporte) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

LOPES, E. S. S.; MAGINA, F. F.; ALVES, M. L. Sistema automático de alerta de qualidade da água do rio Paraíba do Sul – uma aplicação do SISMA DEN. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. **Anais...** Curitiba, 2011. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/profile/Eymar\\_Lopes/publication/266294468\\_Sistema\\_automatizado\\_de\\_alerta\\_da\\_qualidade\\_da\\_agua\\_do\\_rio\\_Paraiba\\_do\\_Sul\\_uma\\_aplicacao\\_do\\_SISMA DEN/links/55267bfd0cf2628d5afe000a/Sistema\\_automatizado-de-alerta-da-qualidade-da-agua-do-rio-Paraiba-do-Sul-uma-aplicacao-do-SISMA DEN.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Eymar_Lopes/publication/266294468_Sistema_automatizado_de_alerta_da_qualidade_da_agua_do_rio_Paraiba_do_Sul_uma_aplicacao_do_SISMA DEN/links/55267bfd0cf2628d5afe000a/Sistema_automatizado-de-alerta-da-qualidade-da-agua-do-rio-Paraiba-do-Sul-uma-aplicacao-do-SISMA DEN.pdf)>. Acesso em 28 de julho de 2019.

LORENZ, D. Temperature measurements of natural surfaces using infrared radiometers. **Applied Optics**, v. 7, n. 9, 1968.

LOWE, D. G. Object recognition from local scale-invariant features. In: Proc. of the International Conference on Computer Vision. **Anais...** Corfu, 1999. Disponível em: <<https://www.cs.ubc.ca/~lowe/papers/iccv99.pdf>>. Acesso em 08 de abril de 2019.

LOWE, D. G. Distinctive Image Features from scale-invariant key points. **International Journal of Computer Vision**, v. 60, n. 2, p. 91-11, 2004.

LUCCA, E. V. D.; BASTOS, A. F. Sistema imageador infravermelho termal: características, descrição e resultados. In: X Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2001. Disponível em: <<http://marte.sid.inpe.br/col/dpi.inpe.br/lise/2001/09.24.08.40/doc/1433.1440.279.pdf>>. Acesso em 30 de janeiro de 2018.

LUZ, B. R. Attenuated total reflectance spectroscopy of plant leaves: a tool for ecological and botanical studies. **New phytologist**, v. 172, n. 2, p. 305-318, 2006.

LUZ, C. C. D. **Avaliação da exatidão absoluta de ortofoto obtida por meio de dados brutos oriundos de veículos aéreos não tripulados (SISVANT).**

Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

MAES, W. H.; HUETE, A. R.; STEPPE, K. Optimizing the processing of UAV-based thermal imagery. **Remote Sensing**, v. 9, n. 5, p. 476, 2017.

MALLAST, U.; SIEBERT, C.; WAGNER, B.; SAUTER, M.; GLOAGUEN, R.; GEYER, S.; MERZ, R. Localization and temporal variability of groundwater discharge into the Dead Sea using thermal satellite data. **Environ Earth**, v. 69, p. 587-603, 2013.

MASHIKI, M. Y. **Geoprocessamento na identificação de Ilhas de Calor e influência do uso e ocupação do solo na temperatura aparente da superfície do município de Botucatu/SP**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2012.

MENESES, P. R. Princípios de sensoriamento remoto. In: ALMEIDA, T. D.; MENESES, P. R. **Introdução ao processamento de imagens de sensoriamento remoto**. Brasília: CNPq, 2012. Cap. 1, p. 276.

MONTANARI, R. **Detecção e classificação de objetos em imagens para rastreamento de veículos**. Dissertação (Mestrado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

MORAES, E. C. D. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto**, 2002.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. Viçosa: UFV, 2011.

MOREIRA, E. B. M.; NÓBREGA, R. S. Uso de imagens multiespectrais aplicada à análise espaço-temporal dos padrões de temperatura e albedo da superfície. In: XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. **Anais...** Curitiba, 2011. Disponível em: <<https://www3.ufpe.br/tropoclima/images/pdf/moreira.pdf>>. Acesso em 16 de julho de 2019.

MOSLEY, M. P. Variability of water temperatures in the braided Ashley and Rakaia Rivers, N.Z. **Journal of Marine Research**, v. 17, p. 331-342, 1983.

MURRAY, G. L. D.; EDMONDS, R. L.; MARRA, J. L. Influence of partial harvesting on stream temperatures, chemistry, and turbidity in forests on the western Olympic Peninsula, **Washington. Northwest Science**, v. 74, p. 151-164, 2000.

NEVES, A. O. **Aplicação do índice padronizado de precipitação para análise da seca 2014/2015 na porção paulista da bacia do rio Paraíba do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica na área de Gestão

Ambiental e Sustentabilidade) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

NISHITANI, A. T. N. **Localização baseada em odometria visual**. Dissertação (Mestrado em Ciências – Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015.

NOVO, E. M. L. D. M. **Sensoriamento remoto: Princípios e Aplicações**. 4.ed. São Paulo: Blucher, 2010.

OLIVEIRA, L. T. D. **Avaliação do uso de sensor termal a bordo de VANT através de análises radiométricas, espectrais, espaciais e posicionais**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2017.

PAVÃO, V. M.; QUERINO, C. A. S.; BENEDITTI, C. A.; PAVÃO, L. L.; QUERINO, J. K. A. S.; MACHADO, N. G.; BIUDES, M. S. Aplicação do sensoriamento remoto na determinação da temperatura da superfície em diferentes tipos de cobertura no município de Humaitá – AM. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. **Anais...** João Pessoa, 2015. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p0601.pdf>>. Acesso em 18 de julho de 2019.

PERCEBON, C. M.; BITTENCOURT, A. V. L.; FILHO, E. F. R. Diagnóstico da temperatura das águas dos principais rios de Blumenau, SC. **Boletim Paranaense de Geociências**, v. 56, p. 7-19, 2005.

PEREIRA, C. C.; MARIANO, Z. F.; WACHHOLZ, F.; CABRAL, J. B. P. Avaliação da temperatura de superfície continental (TSC) e o uso da terra na bacia da Usina Hidrelétrica de Barra dos Coqueiros (GO), por meio do sensoriamento remoto. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 18, n. 12, p. 92-107, 2016.

PIX4D. **Pix4Dmapper Software Manual Support, 2016**. Disponível em: <[https://s3.amazonaws.com/mics.pix4d.com/KB/Getting+Started+PDFs/traducti ons/Pix4Dmapper\\_Getting\\_Started\\_Master\\_4.0\\_PT\\_FINAL.pdf](https://s3.amazonaws.com/mics.pix4d.com/KB/Getting+Started+PDFs/traducti ons/Pix4Dmapper_Getting_Started_Master_4.0_PT_FINAL.pdf)> .Acesso em 21 janeiro 2018.

PRIANTI JUNIOR, N. G. **Alteração na natureza da água do rio Paraíba do Sul e sua influência nos processos de potabilização no município de Jacareí - SP**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo - Universidade Estadual de Campinas, Campinas 2009.

RODRIGUES, M. T. A. **Detecção de mudanças em cenas terrestres usando imagens aéreas**. Tese (Doutorado em Ciência da Computação) – Departamento de Ciência da Computação, Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Geral, Belo Horizonte, 2016.

ROIG, H. L.; FERREIRA, A. M. R.; MENEZES, P. H. B. J.; MAROTTA, G. S. Uso de câmeras de baixo custo acopladas a veículos aéreos leves no estudo do aporte de sedimentos no Lago Paranoá. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 16. **Anais...** Foz do Iguaçu, 2013. Disponível em: . Acesso em 15 de fevereiro de 2018.

ROSA, D. M. **A evolução da qualidade das águas do rio Paraíba do Sul.** Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

RUTHERFORD, J. C.; BLACKETT, S.; SAITO, L.; DAVIES-COLLEY, R. J. Predicting the effects of shade on water temperature in small streams. **New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research**, v. 31, p. 707-721, 1997.

SAAE - SERVIÇO AUTÔNOMO DE ÁGUA E ESGOTO DE JACAREÍ. Divisão de Controle Operacional. Dados dos Sistemas Produtores - P 518. Planilha Estatística de Ligações, Economias e Consumo. SAAE: Jacareí. 2006.

SAMPAIO, J. S.; MACIEL, D. A.; LACERDA, M. G.; KUX, H. J. H. Avaliação da exatidão planimétrica de um ortomosaico gerado a partir de imagens termais obtidas a bordo de VANT. In: XIX Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR. **Anais...** Santos, 2019. Disponível em: <<https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/avaliacao-da-exatidao-planimetrica-de-um-ortomosaico-gerado-a-partir-de-imagens-termiais-obtidas-a-bordo-de-vant?lang=pt-br>>. Acesso em 02 de junho de 2019.

SEVERINO, B. **Calibração de um medidor de emissividade com a utilização do termovisor.** Dissertação (Graduação em Engenharia Mecânica), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, L. B. C. **Avaliação espaço-temporal de metais pesados no rio Paraíba do Sul e rio Imbé por meio de plantas de Eichhorniacrassipesi (Mart.) Solms (Aguapé), séston e sedimento.** Dissertação (Mestrado em Ecologia e Recursos Naturais) – Centro de Biociências e Biotecnologia da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campo dos Goytacazes, 2008.

SILVA, W. **Navegação autônoma de VANT em período noturno com imagens infravermelho termal.** Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2016.

SILVA, R. E. **Desempenho em alcance e caracterização de sistemas sensores eletro-ópticos termais.** Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias Espaciais, Área de Física e Matemática Aplicadas) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2018.

SILVA, N. G. **Avaliação de técnica de navegação aérea autônoma por imagens com uso de sensor termal de baixo custo.** Dissertação (Graduação em Engenharia Eletrônica) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2018.

SILVA, N. M. D.; CÂNDIDO, A. K. A.; PARANHOS FILHO, A. C. Imagens de alta resolução espacial de veículos aéreos não tripulados (VANT) no planejamento do uso e ocupação do solo. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 38, p. 147-156, 2015.

SILVA, R. C. F.; LOPES, C. S.; OLIVEIRA, F. G.; FERNANDES, A. L. T.; ASSIS, L. C. Relação entre cobertura e temperatura do solo em região periurbana do Cerrado. **Revista Agrogeoambiental**, v. 10, n. 4, p. 127-140, 2018.

SINOKRIOT, B. A.; GULLIVER, J. S. In-stream flow impact on river water temperatures. **Journal of Hydraulic Research**, v. 38, p. 339-349, 2000.

SOBRINO, J. A.; JIMÉNEZ-MUNÓZ, J. C.; LABED-NACHBRAND, J.; NERRY, F. Surface emissivity retrieval from digital airborne imaging spectrometer data. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D23, p. ACL 24-1 - 24-13, 2002.

SOUZA, F. F. C.; RIBEIRO, C. B. M.; FRAGOSO JR, C. R.; OTENIO, M. H. Modelagem do regime térmico de um reservatório tropical de abastecimento público, Juiz de Fora, MG, Brasil. **Revista Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, Taubaté, v. 11, n. 1, 2016.

STANFORD RESEARCH SYSTEMS. **Model SR510 Lock-in amplifier.** 2013.

STEFFEN, D. A.; STURM, R. E.; RINARDE, G. A. **Vital signs monitoring system.** U.S. Patent n. 4,270,547, 2 jun. 1981.

TARALLO, A. S. **Construção automática de mosaicos de imagens digitais aéreas agrícolas utilizando transformada SIFT e processamento paralelo.** Tese (Doutorado em Ciências) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos. 2013.

TORGERSEN, C. E.; FAUX, R. N.; MCINTOSH, B. A.; POAGE, N. J.; NORTON, D. J. Airborne thermal remote sensing for water temperature assessment in rivers and streams. **Remote Sensing of Environment**, v. 76, n. 3, p. 386-398, 2001.

VALOR, E.; CASELLES, V. Mapping land surface emissivity from NDVI: application to European, African, an South American Areas. **Remote Sens. Environ.**, v. 57, p. 167-184, 1996.

VICENTE, L. E.; SOUZA FILHO, C. R. Identification of mineral components in tropical soils using reflectance spectroscopy and advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data. **Remote Sensing of Environment**, v. 115, n. 8, p. 1824-1836, 2011.

VOELZ, D. G. **Computational Fourier optics: a MATLAB tutorial**. Bellingham, WA: SPIE. 259 p. 2011.

WALKER, J. H.; LAWSON, J. D. Natural stream temperature variations in a catchment. **Water Research**, v. 11, p. 373-377, 1977.

WARD, J. V. Thermal characteristics of running waters. **Hydrobiology**, v. 125, p. 31- 46, 1985.

WEBER, I.; JENAL, A.; KNEER, C. BONGARTZ, J. PANTIR – a dual camera setup for precise georeferencing and mosaicing of thermal aerial images. **International Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XL-3/W2, p. 269-272, 2015.

ZANETTI, J. **Influência do número e distribuição de pontos de controle em ortofotos geradas a partir de um levantamento por VANT**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2017.





## APÊNDICE A - ROTINA DE CÁLCULO DO PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS RGB

Neste anexo, é apresentada a rotina de cálculo desenvolvida em ambiente MATLAB para o pré-processamento das imagens RGB.

```
%ESPECIFICAR DIRETÓRIO
local = 'E:\odometria_visual_2\
fixo = '20181219';
ext_1 = 1128;
ext_2 = 100;

for i=1:120.
    if i==1
        -----
        %IDENTIFICAR O NOME DO ARQUIVO DA PRIMEIRA IMAGEM
        string_img_rgb_1 = strcat(local,fixo,'_',num2str(ext_1),'_',num2str(ext_2),'jpg');

        %ENTRAR COM A PRIMEIRA IMAGEM
        imagem_rgb_1 = imread(string_img_rgb_1);

        %RECORTAR IMAGEM RGB
        imagem_rgb_1 = imcrop(imagem_rgb_1, [188 0 1470 1080]);

        %GERAR IMAGEM RECORTADA
        [imgout]= imagem_rgb_1;

        %SALVAR NOVA IMAGEM
        imwrite(imgout, strcat(local,fixo,'_',num2str(ext_1),'_',num2str(ext_2),'jpg'))
        -----
    else
        -----
        %EIDENTIFICAR O NOME DO ARQUIVO DAS OUTRAS IMAGENS
        string_img_rgb_1 = strcat(local, fixo,'_',num2str(ext_1),'_',num2str(ext_2+i),'jpg');

        %ENTRAR COM AS IMAGENS
        imagem_rgb_1 = imread(string_img_rgb_1);

        %RECORTAR IMAGENS
        imagem_rgb_1 = imcrop(imagem_rgb_1, [188 0 1470 1080]);

        %GERAR IMAGENS RECORTADAS
        [imgout]= imagem_rgb_1;

        %SALVAR IMAGENS RECORTADAS
        imwrite(imgout, strcat(local, fixo,'_', num2str(ext_1),'_',num2str(ext_2+i),'jpg'))
        -----
    end
end
```



## APÊNDICE B - ROTINA DE CÁLCULO DO PRÉ-PROCESSAMENTO DAS IMAGENS TIR

Neste anexo, é apresentada a rotina de cálculo desenvolvida em ambiente MATLAB para o pré-processamento das imagens aéreas TIR.

```
%ESPECIFICAR DIRETÓRIO
local = 'E:\odometria_visual_2\
fixo = '20181219';
ext_1 = 1128;
ext_2 = 100;

for i=1.:120.
    if i==1
        -----
        %IDENTIFICAR O NOME DO ARQUIVO DA PRIMEIRA IMAGEM
        string_img_termal_1 = strcat(local, fixo,'_',num2str(ext_1),'_',num2str(ext_2),'tiff');

        %ENTRAR COM A PRIMEIRA IMAGEM
        imagem_termal_1 = imread(string_img_termal_1);

        %REAMOSTRAR PRIMEIRA IMAGEM
        imagem_termal_1 = imresize(imagem_termal_1, [1080 1471]);

        %CONVERTER IMAGEM PARA 8 BITS (NORMALIZAÇÃO)
        imagem_termal_1 = double(double(imagem_termal_1 - nanmin(imagem_termal_1(:)) ) /
        double(nanmax(imagem_termal_1(:)) - nanmin(imagem_termal_1(:)) ));

        %GERAR IMAGEM
        [imgout]= imagem_termal_1;

        %SALVAR IMAGEM
        imwrite(imgout, strcat(local, fixo,'_', num2str(ext_1),'_',num2str(ext_2),'tiff'))
        -----
    else
        -----
        %IDENTIFICAR O NOME DO ARQUIVO DAS OUTRAS IMAGENS
        string_img_termal_1 = strcat(local, fixo,'_',num2str(ext_1),'_',num2str(ext_2+i),'tiff');

        %ENTRAR COM OUTRAS IMAGENS
        imagem_termal_1 = imread(string_img_termal_1);

        %REAMOSTRAR OUTRAS IMAGENS
        imagem_termal_1 = imresize(imagem_termal_1, [1080 1471]);

        %CONVERTER OUTRAS IMAGENS
        imagem_termal_1 = double(double(imagem_termal_1 - nanmin(imagem_termal_1(:)) ) /
        double(nanmax(imagem_termal_1(:)) - nanmin(imagem_termal_1(:)) ));

        %GERAR OUTRAS IMAGENS
        [imgout]= imagem_termal_1;
    end
end
```

```
%SALVAR OUTRAS IMAGENS
```

```
imwrite(imgout, strcat(local, fixo,'_', num2str(ext_1),'_',num2str(ext_2+i),'.tiff'))
```

---

```
end
```

```
end
```

## APÊNDICE C - ROTINA DE CÁLCULO DO EMPILHAMENTO DAS BANDAS DAS IMAGENS RGB E TIR

Neste anexo, é apresentada a rotina de cálculo desenvolvida no RStudio para o empilhamento (*stacking*) das bandas pertencentes às imagens RGB e TIR.

```
%BIBLIOTECA
library(raster)

%ENTRAR COM IMAGENS TIR
arq.tif = list.files("./teste/", pattern = ".tiff", full.names = T)

%ENTRAR COM IMAGENS RGB
arq.jpg = list.files("./teste/", pattern = ".jpg", full.names = T)

for(i in 1:length(arq.tif))
{

%REALIZA A FUSÃO DAS IMAGENS TIR E RGB
fusao = stack(stack(arq.jpg[i]), raster(arq.tif[i]))

%ADICIONA AO NOME DO ARQUIVO O F DE FUSÃO E SALVA
nome.arq = paste0("./fusao/", "20181219", substring(arq.tif[i], 11))
print(paste0("img: ", i, " - ", Sys.time()))

writeRaster(fusao, nome.arq, overwrite=TRUE)

}
```



## APÊNDICE D - ROTINA DE CÁLCULO PARA O PROCESSAMENTO DAS IMAGENS ATRAVÉS DOS ALGORITMOS SIFT E RANSAC

Neste anexo, é apresentada a rotina de cálculo desenvolvida em ambiente MATLAB para o processamento das imagens aéreas a partir dos algoritmos SIFT e RANSAC. Esta rotina foi criada utilizando como base os algoritmos desenvolvidos por KE YAN (2011), disponível no *MathWorks* - biblioteca MATLAB.

```
%ESPECIFICAR DIRETÓRIO
local = 'E:\odometria_visual_2\'
fixo = '20181219';
ext_1 = 1128;
ext_2 = 210;

for i=1:1.
    if i == 1

-----
        %IDENTIFICAR O NOME DO ARQUIVO DA PRIMEIRA E SEGUNDA IMAGENS
        ext_2 = ext_2 + i;
        string_img_rgb_1 = strcat(local, fixo, '_', num2str(ext_1), '_', num2str(ext_2), '.jpg');
        string_img_rgb_2 = strcat(local, fixo, '_', num2str(ext_1), '_', num2str(ext_2 + 1.), '.jpg');

        %ENTRAR COM A PRIMEIRA IMAGEM E A SEGUNDA IMAGEM
        imagem_rgb_1 = imread(string_img_rgb_1);
        imagem_rgb_2 = imread(string_img_rgb_2);

        %CONVERTER IMAGENS RGB EM NÍVEIS DE CINZA
        imagem_rgb_1 = rgb2gray(imagem_rgb_1);
        imagem_rgb_2 = rgb2gray(imagem_rgb_2);

        %IDENTIFICAR PONTO HOMÓLOGOS
        [img_rgb_out, matchLoc1, matchLoc2] = imMosaic( imagem_rgb_1, imagem_rgb_2, 1)

-----
        %IDENTIFICAR O NOME DO ARQUIVO DAS IMAGENS TIR
        string_img_termal_1 = strcat(local, fixo, '_', num2str(ext_1), '_', num2str(ext_2), '.tiff');
        string_img_termal_2 = strcat(local, fixo, '_', num2str(ext_1), '_', num2str(ext_2 + 1.), '.tiff');

        %ENTRAR COM AS IMAGENS TIR
        imagem_termal_1 = imread(string_img_termal_1);
        imagem_termal_2 = imread(string_img_termal_2);

        %RETIRAR VALORES VAZIOS (CONSIDERANDO -9999)
        imagem_termal_1(imagem_termal_1 == -9999) = NaN ;
    end
end
```

```

imagem_termal_2(imagem_termal_2==-9999) = NaN ;

%COCATENAR PONTOS HOMÓLOGOS
[imgout] = imMosaic2(matchLoc1,matchLoc2,imagem_termal_1,imagem_termal_2,1)
-----
%MANTENDO O MOSAICO GERADO
else
-----

%ENTRAR COM O MOSAICO GERADO ANTERIORMENTE
imagem_rgb_1 = img_rgb_out;

%IDENTIFICAR O NOME DA PRÓXIMA IMAGEM
string_img_rgb_2 = strcat(local, fixo,'_',num2str(ext_1),'_',num2str(ext_2 + i),'.jpg');

%ENTRAR COM A PRÓXIMA IMAGEM
imagem_rgb_2 = imread(string_img_rgb_2);

% CONVERTER IMAGENS RGB EM NÍVEIS DE CINZA
imagem_rgb_2 = rgb2gray(imagem_rgb_2);

%IDENTIFICAR PONTO HOMÓLOGOS
[img_rgb_out,matchLoc1,matchLoc2] = imMosaic( imagem_rgb_1,imagem_rgb_2,1);
-----

%ENTRAR COM O MOSAICO TIR GERADO ANTERIORMENTE
imagem_termal_1 = imgout;

%IDENTIFICAR O NOME DA PRÓXIMA IMAGEM TIR
string_img_termal_2 = strcat(local, fixo,'_',num2str(ext_1),'_',num2str(ext_2 + i),'.tiff');

%ENTRAR COM A PRÓXIMA IMAGEM TIR
imagem_termal_2 = imread(string_img_termal_2);

%RETIRAR VALORES VAZIOS (CONSIDERANDO -9999)
imagem_termal_2(imagem_termal_2==-9999) = NaN ;

%IDENTIFICAR E CASAR OS PONTOS HOMÓLOGOS NAS IMAGENS TIR
[imgout] = imMosaic2(matchLoc1,matchLoc2,imagem_termal_1,imagem_termal_2,1);
-----

end

end

%SALVAR MOSAICO TERMAL GERADO
imwrite(imgout,'mosaicao210.jpg')

```



## APÊNDICE E - ROTINA DE CÁLCULO PARA O PROCESSAMENTO DAS IMAGENS ATRAVÉS DOS ALGORITMOS SIFT E RANSAC

Neste anexo, é apresentada a rotina de cálculo desenvolvida no RStudio para a detecção de pontos de mudança.

```
library(ggplot2)
library(viridis)
library(reshape2)
library(cowplot)
library(reshape2)
library(cowplot)

setwd("E:\\DISSERTAÇÃO_28_07")
dados = raster("/Resultados/Temperatura/Mosaico_Temp.tif") #Abri o tif
dados[dados<23.2] = NA #tirar os °0°

dados = as.matrix(dados)
max(dados, na.rm = T)
min(dados, na.rm = T)
tmax = 36
tmin = 23

ncol(dados)
nrow(dados)

#CALCULANDO A MEDIA DOS VALORES POR LINHA E POR COLUNA
linha = data.frame("ID"=seq(1,ncol(dados),1),"MD" = apply(dados, 2,mean, na.rm=T), "SD" =
apply(dados, 2,sd, na.rm=T))
coluna = data.frame("ID"=seq(1,nrow(dados),1),"MD" = apply(dados, 1,mean, na.rm=T), "SD"
= apply(dados, 1,sd, na.rm=T))

#FAZENDO O CALCULO DOS PONTOS DE MUDANÇA
pts.linha = cpt.mean(linha$MD*100, method = 'BinSeg')
pts.col = cpt.mean(coluna$MD*100, method = 'BinSeg')

#GRÁFICO DE TEMPERATURA PARA A LINHA
lin =
ggplot()+
geom_ribbon(data = linha, aes(x=ID, ymin = MD-SD, ymax = MD+SD), fill="grey70",
alpha=0.6)+
geom_line(data = linha, aes(x=ID, y=MD, col=MD), size=1.5)+
geom_vline(xintercept = pts.linha@cpts,linetype="dashed")+
scale_color_viridis(option = "B",limits = c(tmin,tmax), breaks = seq(tmin,tmax,2))+
scale_x_continuous(expand = c(0,0))+
theme(legend.position = "transparent", axis.title.x = element_blank(), axis.text.x =
element_blank(),
axis.title.y = element_blank(),axis.text = element_text(size = 9))#, axis.text.y =
element_blank()
```

```

lin

#GRAFICO DE TEMPERATURA PARA A COLUNA
col=
ggplot()+
geom_ribbon(data = coluna, aes(x=ID, ymin = MD-SD, ymax = MD+SD), fill="grey70",
alpha=0.6)+
geom_line(data = coluna, aes(x=ID, y=MD, col=MD), size=1.5)+
geom_vline(xintercept = pts.col@cpts,linetype="dashed")+
scale_color_viridis(option = "B",limits = c(tmin,tmax), breaks = seq(tmin,tmax,2))+
scale_y_continuous(position = 'right')+
scale_x_reverse(expand = c(0,0))+
coord_flip()+
theme(legend.position = "transparent", axis.title.y = element_blank(), axis.text.y =
element_blank(),
axis.title.x = element_blank(),axis.text = element_text(size = 9)) #, axis.text.x =
element_blank()
col

#PLOTANDO O MAPA
mapa = melt(dados)
mp =
ggplot(mapa, aes(x=Var2, y=Var1, fill=value))+
geom_tile()+
scale_x_continuous(expand = c(0,0), sec.axis = dup_axis()+
scale_y_reverse(expand = c(0,0), sec.axis = dup_axis()+
scale_fill_viridis(option = "B",limits = c(tmin,tmax), breaks =
seq(tmin,tmax,2),na.value="white",
guide= guide_colourbar(nbin = 100, draw.ulim = F, draw.llim = F))+
theme(axis.title = element_blank(), axis.text = element_blank(),
axis.ticks = element_blank(),
legend.title = element_blank(),legend.position = "bottom",
legend.key.width = unit(2.2, 'cm'), text = element_text(size = 9))

mp

#AGRUPANDO TODAS OS GRÁFICOS EM 1 SÓ
a=
ggdraw()+
draw_plot(mp, x = 0.03, y=0 , width = 0.75 , height = 0.7)+
draw_plot(lin, x = 0.0 , y=0.7 , width = .77 , height = 0.2)+
draw_plot(col, x=0.75 , y=0.145, width = 0.2 , height = 0.57)
a

#SALVANDO
jpeg("/Resultados/Mosaico_Ponte_PontoMudanca.jpg", width = 15, height = 12, units = 'cm', res
= 450)
print(a)
dev.off()

```

