



UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Manuel João Pintado Alves Batista Lopes

MEIOS AÉREOS DE APOIO À DECISÃO
AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE MEIOS AÉREOS
NÃO TRIPULADOS EM ENSAIOS DE CAMPO COM FOGO
EXPERIMENTAL

VOLUME 1

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica orientada pelo Professor Doutor Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas e coorientada pelo Professor Doutor Jorge Rafael Nogueira Raposo apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica.

Setembro de 2019

1 2



9 0

FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE
COIMBRA

Meios Aéreos de Apoio à Decisão

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Aerial Means Supporting Strategic Decision

Autor

Manuel João Pintado Alves Batista Lopes

Orientadores

Domingos Xavier Filomeno Carlos Viegas

Jorge Rafael Nogueira Raposo

Júri

Presidente	Professor Doutor José Manuel Baranda Ribeiro Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Jorge Rafael Nogueira Raposo Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra Professor Doutor Carlos Xavier Pais Viegas Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor Major Luís Filipe da Silva Félix Diretor do Centro de Investigação da Academia da Força Aérea

Colaboração Institucional



Centro de Estudos
sobre Incêndios
Florestais



Associação para o
Desenvolvimento da
Aerodinâmica Industrial

Coimbra, Setembro, 2019

“A Terra será como são os Homens”

(provérbio náuatle)

Agradecimentos

Fundamentalmente, são os vários protagonistas do nosso quotidiano que definem o desfecho das várias provações que a vida nos proporciona. Deste modo, não posso deixar de agradecer às pessoas que acompanharam a fase final do meu percurso académico.

Em primeiro lugar agradeço ao CEIF e ADAI por terem facilitado os meios e os conhecimentos necessários à realização desta tese de mestrado e particularmente aos projetos FIREFRONT, FIRESTORM e ReNature pelo financiamento e apoio prestado no âmbito deste trabalho. Agradeço também à Força Aérea Portuguesa pelo valioso contributo e dimensão que atribuem aos estudos realizados através da sua participação. Nomeadamente agradeço ao MAJ/PIL Edgar Veloso e SCH/MMA/FE Rui Lopes pela ajuda prestada no esclarecimento dos assuntos relativos a aspetos operacionais de voo de aeronaves.

Um sincero agradecimento ao Professor Doutor Domingos Xavier Viegas por ter orientado e supervisionado a realização deste trabalho e por ter permitido um acompanhamento privilegiado do projeto no qual a presente tese de mestrado se insere.

É com grande apreço que agradeço ao Professor Doutor Jorge Rafael Raposo por ter permitido realizar a dissertação sobre a sua orientação, pela incondicional disponibilidade e, acima de tudo, atitude positiva e amizade que ajudaram a ultrapassar as adversidades que marcaram a realização deste trabalho. Com efeito, agradeço também a todos os elementos que formam a equipa do CEIF, e em particular ao Abdelraham Abouali, que sempre demonstraram vontade e abertura em ajudar quando solicitado.

Gostaria de agradecer ao Professor Doutor Miguel Rosa Panão pelas palavras que revelaram a sua sensibilidade e preocupação para com o crescimento dos seus alunos.

Deixo também o meu sincero agradecimento à Melissa Margarida, com quem partilhei e ultrapassei todos os desafios que caracterizaram uma caminhada definitivamente árdua. Obrigado por todo o apoio e carinho.

Ao meu tio e padrinho Dr. Jorge Pintado, um sincero agradecimento por ter estado presente num dos momentos mais marcantes da minha vida académica e por ter frequentemente ajudado a aliviar os sintomas causados por longas jornadas de estudo.

Finalmente, devo o mais especial agradecimento aos meus pais por estabelecerem o exemplo que é a fundação do meu ser. Obrigado por me ajudarem a atingir os meus objetivos, pelo amor, e por sempre confiarem nas minhas capacidades, independentemente do resultado.

Resumo

A aplicação de veículos aéreos não tripulados (VANTs) no cenário dos incêndios florestais observa uma tendência crescente a nível mundial. Para que a sua aplicação em operações de monitorização e deteção da evolução do fogo nos incêndios florestais seja mais eficaz recorrem-se a técnicas de aquisição e tratamento de imagem térmica.

Na presente dissertação foi delineada uma estratégia para execução de planos de voo para aquisição de imagem térmica a diferentes altitudes com recurso a VANTs, sobre ensaios de campo com fogo experimental. Estes têm como objetivo estudar a influência que a distância do sensor ao fogo (*working distance*) exerce na precisão dos dados extrapolados a partir da imagem aérea. De facto, a presença da atmosfera terrestre constitui uma barreira com permeabilidade seletiva à passagem de radiação térmica. Nomeadamente o vapor de água e o dióxido de carbono absorvem radiação na gama típica de emissão da frente de fogo.

Durante a realização de ensaios com fogo experimental foram recolhidas imagens térmicas por um VANT de perfil tático, tendo-se analisado um dos conjuntos de imagens de uma das experiências. Para que fosse possível visualizar a evolução do processo de ignição, identificação e localização geográfica da frente de fogo, além do cálculo de parâmetros característicos do fogo, foram realizados diversos tratamentos à imagem original, incluindo a criação de filmes compósitos. Os resultados obtidos com as imagens aéreas foram comparados com os de uma câmara térmica fixa no solo (grupo de controlo). O termo de comparação estabelecido pelo grupo de controlo permitiu calcular o desvio entre os valores dos parâmetros característicos do fogo calculados a partir das duas plataformas. Este cálculo foi individualizado para os conjuntos de instantes adquiridos a cada patamar de altitude realizado pelo VANT e também para diferentes ordenadas da parcela do ensaio. Comparou-se então o desvio obtido considerando a totalidade da frente e apenas a zona média.

O cálculo do desvio (RMS) tem como objetivo estimar a altitude ótima para aquisição de imagem térmica, da qual resulte na melhor precisão dos dados extrapolados a partir da imagem térmica. Idealmente poderia ser construída uma função matemática que relacionasse a altitude com a precisão dos dados obtidos. Este estudo revelou-se inconclusivo, uma vez que não se verificou a existência de um padrão nos valores de desvio obtidos para os diferentes patamares de altitude. Evidenciaram-se, no entanto, as vantagens oferecidas pela aquisição de informação com recurso a VANTs, quando comparado com a aquisição estática no solo.

Foi também possível concluir acerca da inadequação do sensor utilizado na plataforma aérea para aquisição de imagem térmica da frente de fogo durante os ensaios, através da comparação dos dados obtidos através do grupo de controlo.

Palavras-chave: Incêndios Florestais, Radiação térmica, Ensaios de campo, VANT, Distância ao sensor.

Abstract

The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in forest fire applications has witnessed a worldwide growth spurt over the last few years. In order to effectively carry out detection and monitoring operations involving fire, we take advantage of its temperature characteristics by using thermal imaging technics.

During this research a strategy for the execution of consistent flight plans was developed, in order to acquire thermal image at various altitudes using UAVs over prescribed fire experiments. The main goal is to understand how the working distance (distance from the thermal sensor to the fire front) influences the precision of the gathered data. In effect, the earth's atmosphere acts as a barrier with selective permeability towards different radiation wavelengths. Namely water vapor and carbon dioxide absorb most of the typical thermal radiation wavelengths emitted by a forest fire.

Thermal image was gathered during prescribed fire experiments, having been analysed one set of images from one of the experiments. This task was conducted through the creation of composite videos in order to identify the evolution of ignition fires, identification and geolocalization of the fire front, and lastly, the calculation of characteristic fire parameters. The results obtained with the aerial image were compared with a set of images gathered by a thermal camera fixed to the ground, which acted as a control group.

The reference established by the control group allowed the estimation of the root-mean-square deviation (RMS) between the fire parameters calculated using the aerial image and control image. The results were individualized for the time periods spent at the different altitude levels performed by the UAV and also for different fire front regions. Finally, a comparison of the deviation results considering all the fire front line and only the centre zone of the fire front was made.

The objective of this last operation is to estimate an optimum altitude for performing thermal imaging flights, which results in best data precision. Ideally a mathematical function which described the degree of data precision with altitude would be built. Due to several limitations, including having a small database and at only low level altitudes, this study demonstrated to be inconclusive as the deviation values did not display a pattern regarding altitude. However, the advantages of thermal acquisition using UAVs were reinforced, compared to the established use of static thermal sensors on the ground.

By using the control image as reference, it was also possible to conclude about the unsuitability of the thermal sensor payload on capturing the fire front.

Keywords Forest fires, Thermal radiation, Prescribed fire, UAV, Working distance.

Índice

Índice de Figuras	ix
Índice de Tabelas.....	xiii
Siglas e Simbologia.....	xv
Simbologia.....	xv
Siglas.....	xvi
1. Motivação.....	19
2. Introdução.....	22
2.1. Surgimento dos VANTs nos Incêndios Florestais	22
2.2. Casos de Estudo	24
2.2.1. NASA Ikhana UAS.....	24
2.2.2. Integrated Vegetation Fire Management	26
2.2.3. Projeto Sky Eye	27
2.3. Notas Finais	28
2.3.1. VANTs de Perfil Estratégico	28
2.3.2. VANTs de Perfil Tático	29
3. Premissas do Estudo	31
4. Desenho de Ensaios de Campo	33
4.1. Local dos Ensaios	33
4.2. Variáveis e Parâmetros do Estudo	36
4.3. Determinação da Gama de Altitudes de Voo Regulamentares	37
4.4. Posicionamento da Aeronave Relativamente à Frente de Fogo.....	40
4.4.1. Coluna de Fumo	40
4.4.2. Obstáculos Físicos.....	41
4.5. Padrão de Voo	42
4.6. Planos de Voo para VANT Estratégico	44
4.7. Planos de Voo para VANT Tático	47
4.8. Problemas Esperados nos Ensaios	49
4.8.1. Aquisição de Imagem Infravermelha.....	49
4.8.2. Funcionamento e Estabilidade da Aeronave.....	51
5. Equipamento Usado nos Ensaios de Campo.....	52
5.1. Veículo Aéreo Não Tripulado.....	52
5.2. Grupo de Controlo	53
6. Realização dos Ensaios de Campo.....	54
7. Tratamento da Imagem e Análise de Resultados.....	57
7.1. Análise Preliminar à Imagem dos Ensaios	57
7.1.1. Imagem Aérea.....	57
7.1.2. Imagem de Controlo.....	58
7.2. Criação de Filmes Compósitos.....	60

7.3.	Extração e Análise dos Fotogramas.....	61
7.3.1.	Imagem Aérea	62
7.3.2.	Imagem de Controlo.....	64
7.4.	Focos de Ignição Durante o Ensaio	65
7.5.	Identificação da frente de fogo.....	66
7.6.	Problemas Verificados Durante a Identificação da Frente de Fogo	67
7.7.	Localização Geográfica da Frente de Fogo.....	70
7.8.	Cálculo da Velocidade Instantânea e Intensidade de Propagação	75
7.9.	Cálculo da Velocidade Média de Propagação.....	76
7.10.	Análise dos Valores: Velocidade Instantânea e Intensidade	79
7.11.	Análise dos Valores: Velocidade Média	83
7.12.	Análise dos Valores: Cálculo do Desvio	85
8.	Notas Conclusivas	87
9.	Trabalho Futuro	94
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
	ANEXO A – Folha para cálculo de coordenadas do padrão de voo.....	99
	ANEXO B – Frames Extraídos do Filme Compósito, Gest2019_02 – Imagem Aérea.....	103
	ANEXO C – Frames Extraídos do Grupo de Controlo, Gest2019_02– Imagem de Controlo	107
	ANEXO D – Representação Gráfica da Frente de Fogo, Gest2019_02 - Imagem Aérea.	110
	ANEXO E – Representação Gráfica da Frente de Fogo, Gest2019_02 - Imagem de Controlo	113
	ANEXO F – Frente de Fogo Referenciada Geograficamente, Gest2019_02 - Imagem Aérea	116
	ANEXO G – Frente de Fogo Referenciada Geograficamente, Gest2019_02 - Imagem de Controlo	120
	ANEXO H – Tabelas do Cálculo da Velocidade Instantânea e Intensidade de Propagação	124
	ANEXO I – Tabelas do Cálculo da Velocidade Média.....	125
	ANEXO J – Tabela do Cálculo do Desvio.....	126
	ANEXO L – Dimensões das Parcelas Gest2019_01 e Gest2019_02	127

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Foco em estágio inicial captado durante uma operação de monitorização da região da Lousã pela Força Aérea Portuguesa (cedido pela FAP)	21
Figura 2.1: Ikhana com o sensor AMS colocado na parte inferior da asa esquerda (retirado de [17]).....	24
Figura 2.2: Sensor AMS modificado para missões a bordo do Ikhana (a) (retirado de [20]) e comparação de focos detetados a partir do sensor MODIS a bordo do satélite EOS-AM Terra (vermelho) com o detalhe dos focos detetados pelo sensor AMS a bordo do Ikhana (amarelo) (b) (retirado de [17])	25
Figura 2.3: Exemplos de imagens recolhidas durante missões realizadas com VANTs pelo <i>Szendro Fire Department</i> (retirado de [13]).....	26
Figura 2.4: Padrão de voo automático realizado num teste de voo do projeto Sky-Eye (a) e imagem de deteção de foco de incêndio através de fusão de imagem visível e infravermelha (b) (retirado de [21])	27
Figura 2.5: VANT de asa fixa e de perfil táctico, INSITU SCAN EAGLE com equipamento auxiliar de descolagem (a) (retirado de [14]) e VANT usado no projeto “1st” – FIRST (retirado de [23]) (b).....	30
Figura 3.1: VANT OGASSA OGS42, fabricado por UAVision (retirado de [24])	31
Figura 3.2: Cessna 172n propriedade do Aeroclube de Torres Vedras [25].....	32
Figura 4.1: Fotografia aérea das parcelas, tirada com o VANT da ADAI	34
Figura 4.2: Detalhe da localização e dimensões das parcelas dos ensaios realizados no dia 15 de Maio	35
Figura 4.3: Ilustração do padrão de voo em varrimento paralelo (<i>parallel sweep</i>) e campo de visão para sensor inclinado em relação à vertical	43
Figura 4.4: Gráficos representativos das pernas de voo para os ensaios das parcelas Gest2019_02 (a), Gest2019_04 (b), Gest2019_03 (c), Gest2019_06 (d) e Gest2019_07 (e)	47
Figura 4.5: Permeabilidade da atmosfera (transmissibilidade), em relação aos diferentes constituintes da atmosfera, e comprimentos de onda da radiação eletromagnética. A título de exemplo, a presença da água na atmosfera não permite a passagem de radiação na região dos $6\mu\text{m}$ a $8\mu\text{m}$ (retirado de [15]).....	50
Figura 5.1: VANT DJI Mavic 2 Enterprise Dual com câmara térmica M2ED, fabricada pela FLIR (retirado de [33]).....	52
Figura 5.2: Localização do grupo de controlo em relação às parcelas (a) e câmara FLIR (b) (retirada de [34]).....	53
Figura 6.1: Queima da parcela Gest2019_02 (fotografia tirada com o VANT da ADAI). 54	

Figura 6.2: Queima da parcela Gest2019_01 onde é visível a ação direcional que o vento exerce no fogo (a) e o recurso a pinga-lumes para gerar focos de ignição, os quais contrariam este efeito (b) (fotografias tiradas com o VANT da ADAI)	58
Figura 7.1: Exemplo de imagem infravermelha (a) e visível (b) captadas no mesmo instante pelos sensores a bordo do VANT durante o ensaio Gest2019_01	58
Figura 7.2: Exemplo de imagem infravermelha (a) e visível (b) captadas no mesmo instante pelos sensores a bordo do VANT durante o ensaio Gest2019_02	58
Figura 7.3: Segmentação da frente em estágio inicial (a) e em estágio avançado (b).....	59
Figura 7.4: <i>Frames</i> extraídos do ensaio Gest2019_02, representativos da evolução do incêndio nos quatro momentos consecutivos em: (a) – 11h36m51,518,917s; (b) – 11h37m35,281,511s; (c) – 11h38m18,585,438s e (d) – 11h39m04,626,486s; adquiridos à altitude de 15mAGL. Nestes <i>frames</i> evidencia-se a evolução de focos de ignição postos pela equipa do CEIF. O número um (1) refere-se à frente principal, enquanto que os focos de ignição estão numerados de acordo com o momento da sua génese. Apenas os focos ligados com linhas laranja se incluíram como fazendo parte da frente de fogo, de acordo com o exposto no capítulo 6.4	63
Figura 7.5: <i>Frames</i> extraídos do voo realizado no ensaio Gest2019_01, representativos da falta de rigor na aquisição de imagem durante o voo.....	64
Figura 7.6: <i>Frames</i> extraídos da imagem obtida a partir do grupo de controlo, relativos aos mesmos quatro instantes representados na Figura 7.3	65
Figura 7.7: Gráficos resultantes do processo de identificação da frente com o software MicroStation95 para o mesmo conjunto de fotogramas da imagem aérea (a) e de controlo (b)	67
Figura 7.8: Linhas da frente de fogo identificadas para o conjunto de fotogramas captados a 25mAGL antes (a) e após (b) a eliminação de pontos.....	68
Figura 7.9: <i>Frame</i> extraído da imagem de controlo onde se observa a oclusão da frente de fogo pela barreira existente na zona de estreitamento da parcela Gest2019_02	69
Figura 7.10: Gráfico representativo da evolução do incêndio formado a partir da identificação da frente de fogo através da imagem aérea (a) e de controlo (b).....	70
Figura 7.11: Gráficos resultantes do processo de atribuição de coordenadas geográficas à frente de fogo correspondente aos fotogramas obtidos à altitude de 15mAGL, a partir da imagem aérea (a) e de controlo (b).....	73
Figura 7.12: Gráficos representativos da evolução da frente de fogo em coordenadas geográficas elaborados a partir da imagem aérea (a) e de controlo (b)	75
Figura 7.13: Gráficos representativos da evolução da velocidade instantânea de propagação nas diferentes ordenadas da parcela, obtidos a partir da imagem aérea (a) e imagem de controlo (b)	81
Figura 7.14: Gráficos representativos da evolução da intensidade de propagação nas diferentes ordenadas da parcela, obtidos a partir da imagem aérea (a) e imagem de controlo (b)	82

Figura 7.15: Gráficos comparativos dos valores de velocidade média calculados a partir da informação extrapolada da imagem aérea e de controlo, obtidos para as diferentes altitudes de teste: *15mAGL* (a), *20mAGL* (b), *25mAGL* (c) e *30mAGL* (d)..... 83

Figura 7.16: Valores de desvio de acordo com as ordenadas da parcela 86

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 4.1: Detalhes acerca dos ensaios realizados na Gestosa.....	33
Tabela 4.2: Coordenadas dos quatros vértices delimitadores das parcelas	35
Tabela 4.3: Informação das parcelas para auxílio na elaboração dos planos de voo.....	36
Tabela 4.4: Planos de voo delineados para os ensaios de campo.....	45
Tabela 4.5: Plano de voo para o ensaio Gest2019_01 com VANT tático	48
Tabela 4.6: Plano de voo para o ensaio Gest2019_02 com VANT tático	48
Tabela 6.1: Detalhes do voo realizado pelo VANT tático no ensaio Gest2019_01	56
Tabela 6.2: Detalhes do voo realizado pelo VANT tático no ensaio Gest2019_02	56
Tabela 7.1: Tabela representativa do processo de atribuição de coordenadas geográficas às linhas de frente de fogo.....	72
Tabela 7.2: Parâmetros característicos do fogo calculados a partir da imagem de controlo	78
Tabela 7.3: Parâmetros característicos do fogo calculados a partir da imagem aérea	78
Tabela 7.4: Valores de desvio (de acordo com as ordenadas da parcela consideradas).....	85

SIGLAS E SIMBOLOGIA

Simbologia

A – Vértice de referência da parcela de ensaio

P – Ponto da frente de fogo de coordenadas x, y

L – Deslocamento entre P e A

x – Abcissa do ponto P

y – Ordenada do ponto P

α – Ângulo entre o limite inferior da parcela (normal ao sentido de propagação da frente de fogo) e o Norte geográfico, calculado no sentido Este-Norte

β – Ângulo entre L e o limite inferior da parcela (normal ao sentido de propagação da frente de fogo), calculado no sentido Este-Norte

θ – Ângulo entre L e o Norte geográfico

Departure – Distância do ponto P a A em termos de longitude

Latitude – Distância do ponto P a A em termos de latitude

R – Velocidade instantânea de propagação da frente de fogo

t_i – Momento de aquisição de um *frame* contendo a frente de fogo

Δt – Diferença temporal entre um momento de aquisição t_i e o anterior

x_i – Abcissa do ponto P no instante i

Δd – Distância percorrida pela frente de fogo entre dois instantes t_i consecutivos

I – Intensidade de propagação da frente de fogo

H_c – Poder calorífico inferior do combustível florestal

M'_c – Carga (massa) de combustível consumida

\bar{R} – Velocidade média de propagação da frente de fogo

$t_{1,j}$ – Momento de aquisição do primeiro *frame* contendo a frente de fogo à altitude j

$t_{i,j}$ – Momento de aquisição de um *frame* contendo a frente de fogo, a uma determinada altitude j

Δt^* – Diferença temporal entre $t_{i,j}$ e $t_{1,j}$

$x_{i,j}$ – Abcissa de um ponto P no momento $t_{i,j}$, a uma determinada altitude j

$x_{1,j}$ – Abcissa de um ponto P no instante $t_{1,j}$, a uma determinada altitude j

Δd^* – Distância percorrida pela frente de fogo entre os instantes $t_{i,j}$ e $t_{1,j}$

t – Tempo decorrido de ensaio

T – Temperatura

λ_{max} – Comprimento de onda para o qual a intensidade de radiação é máxima para uma determinada temperatura T (aproximação ao modelo de corpo negro)

Siglas

ACTV – Aeroclube de Torres Vedras

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

AIS – Aeronautical information service

AGL – Above ground level

AMS – Autonomous Modular Scanner

ANAC – Autoridade Nacional da Aviação Civil

ANEPC – Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil

ASL – Above sea level

BVLOS – Beyond visual line of sight

CEIF – Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais

COA – Certificate of Authorization

DoD – United States Department of Defense

FAP – Força Aérea Portuguesa

FEB – Força Especial de Bombeiros

fps – frames per second

GCS – Ground control station

GIPS – Grupo de Intervenção e Proteção e Socorro

IT – Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro

LiDAR – Light Detection and Ranging

LWIR – Long wave infrared
MODIS – Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer
MWIR – Medium wave infrared
NASA – National Aeronautics and Space Administration
NATO – North Atlantic Treaty Organization
NIR – Near infrared
RGB – Red, green and blue
RMS – Root mean square
SWIR – Short wave infrared
TIR – Thermal infrared
UAS – Unmanned aerial system
UAV – Unmanned aerial vehicle
USFS – United States Forest Service
VANT – Veículo aéreo não tripulado
VFR – Visual flight rules
WRAP – Wildfire Research and Applications Partnership
WSFM – Western States Fire Missions

1. MOTIVAÇÃO

As florestas constituem um dos bens mais preciosos da natureza, alimentando a génese da biodiversidade e mantendo o equilíbrio dos ecossistemas existentes no nosso planeta. Particularmente em Portugal, um dos principais agentes ameaçadores deste equilíbrio são os incêndios que consistentemente alastram nas mais variadas paisagens, sendo responsáveis pela perda de inúmeras vidas anualmente. Não obstante, são também responsáveis pela libertação de grandes quantidades de gases poluentes para a atmosfera, colocando ainda em perigo a riqueza económica que a floresta cria, não só devido à parcial inutilização dos seus recursos, como também devido ao elevado custo monetário que a mitigação dos efeitos acarreta, durante e após um incêndio.

Portugal passa presentemente por uma mudança no paradigma dos incêndios, assistindo a um aumento de ocorrências com dimensões e consequências desastrosas em alturas improváveis do ano, como é o caso dos incêndios ocorridos no ano de 2017, que além de terem causado danos em habitações, explorações agrícolas, infraestruturas e empresas, resultando em prejuízos na ordem dos milhões de euros, foram responsáveis pela devastação de 500.000 hectares de floresta e causando pelo menos 112 vítimas mortais. [1] [2] [3]

Cenários como este levaram ao surgimento de políticas mais severas na proteção da floresta, principalmente no “reforço e progressiva reorientação de recursos para os pilares da prevenção e vigilância”. (Dec. Lei nº 208 - 27 de Outubro de 2017) A adoção de medidas como a redução de material combustível disponível nas matas, ou melhoria dos métodos de vigilância, revelam-se mais frutíferas e eficazes do que aplicação de medidas supressivas [4], ajudando a diminuir o tempo de resposta dos meios de intervenção e a reduzir a velocidade da propagação do fogo. Além de políticas no sentido de criação, reforço e revisão de missões e estatutos profissionais de vários organismos, tais como o Grupo de Intervenção de Proteção e Socorro (GIPS), Força Especial de Bombeiros (FEB) e Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC), uma das diretivas incumbe a Força Aérea Portuguesa (FAP) da responsabilidade pelo comando e gestão dos meios aéreos de combate aos incêndios. Estes podem tomar a forma de meios próprios do Estado ou outros que sejam necessários através da promulgação de contratos com entidades privadas. (Dec. Lei nº 208 -

27 de Outubro de 2017) No seguimento desta diretiva, a FAP mostrou interesse em dotar aeronaves não tripuladas de cargas sensoriais, capacitando-as para realização de operações de monitorização de incêndios. Isto significa prover os corpos de combate aos incêndios no terreno e os órgãos de decisão e gestão superiores, como a ANEPC, de uma valorosa ferramenta de apoio à decisão.

No seguimento desta diretiva, a FAP, juntamente com um grupo de organizações, incluindo a Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI), o Instituto de Sistemas e Robótica do Instituto Superior Técnico de Lisboa (ISR/IST-ID), o Aeroclube de Torres Vedras (ACTV), o Instituto de Telecomunicações da Universidade de Aveiro (IT) e a empresa UAVision propuseram o projeto FIREFRONT. Este projeto tem como objetivo organizar uma estrutura de suporte à monitorização de incêndios florestais com recurso a imagem térmica recolhida através de veículos aéreos não tripulados (VANT), com foco nas missões de deteção, mapeamento e previsão da progressão de incêndios. Esta informação tem o objetivo de ser difundida em tempo real aos órgãos de tomada de decisão no terreno.

Ainda que o projeto não esteja totalmente implementado, e a imagem térmica não seja ainda usada como principal ferramenta de deteção e monitorização de focos de incêndio, até à presente data a FAP já deu provas das vantagens oferecidas pelo uso de VANTs estratégicos no cenário dos incêndios florestais. Neste momento este organismo opera um VANT OGASSA OGS42, fabricado pela UAVision, que realiza operações de vigilância regulares na região da Lousã, operando num raio de cerca de 70km a 100km em linha de vista com o aeródromo da região. Este meio permitiu que duas ocorrências registadas na região da Lousã no dia 17 de Agosto de 2019, em Ramalhais (**Figura 1.1**) e junto à EN 236 (à saída da Lousã, sentido Norte) fossem detetadas em estágio inicial. A deteção e monitorização destes dois casos resultou numa atuação extremamente eficaz das equipas de combate, registando-se danos mínimos.

O presente estudo encontra-se associado ao projeto FIREFRONT, tendo como primeiro objetivo desenvolver uma metodologia para ensaios e elaboração de planos de voo para aquisição de imagem aérea térmica. Através da aquisição de imagem a diferentes patamares de altitude sobre o fogo pretende-se compreender de que forma a distância do sensor à parcela influencia a identificação e localização geográfica da frente de fogo, além do cálculo de parâmetros característicos do fogo, nomeadamente a velocidade e intensidade

de propagação. Essa influência será contabilizada através da comparação dos dados obtidos através da plataforma aérea e de um grupo de controlo, o qual consiste na captação de imagem térmica de forma estática no solo.



Figura 1.1: Foco em estágio inicial captado durante uma operação de monitorização da região da Lousã pela Força Aérea Portuguesa (cedido pela FAP)

De forma a nutrir este objetivo principal, é necessário cumprir um outro conjunto de objetivos, os quais perfazem a segunda parte do trabalho:

- Verificar a possibilidade de identificação da frente do incêndio durante o decorrer dos ensaios e localizá-la com coordenadas geográficas;
- Determinar parâmetros característicos do fogo através dos dados obtidos a partir da imagem aérea e de controlo, nomeadamente a intensidade da propagação e velocidades instantânea e média de propagação da frente de fogo para os vários instantes do ensaio;
- Determinar o desvio nos resultados dos parâmetros característicos do fogo calculados a partir da imagem aérea às diferentes altitudes e do grupo de controlo, a partir do qual se determina qual a distância da câmara à parcela (*working distance*) que resulta em menor erro.

2. INTRODUÇÃO

Este capítulo pretende relevar a importância dos VANTs como ferramenta essencial no arsenal moderno de combate ao fogo em incêndios florestais, referindo-se também alguns casos notáveis realizados no âmbito da sua aplicação na deteção e monitorização de incêndios florestais. Finalmente introduz-se um capítulo conclusivo com o objetivo de evidenciar as principais diferenças e as missões que melhor se adaptam aos diferentes tipos de VANTs.

2.1. Surgimento dos VANTs nos Incêndios Florestais

Toda e qualquer decisão ou ação realizada pelos corpos de bombeiros durante a deflagração de um incêndio pode ser determinante, sendo a falta de informação sobre a evolução dinâmica do fogo o fator mais significativo na conclusão da operação. [5] De forma a recolher este tipo de informação é necessário recorrer a métodos de monitorização eficazes. O avanço tecnológico das últimas décadas potenciou o desenvolvimento de sistemas de deteção e monitorização automática. Estes baseiam-se na sua maioria em métodos de visão computacional com recurso a câmaras de deteção espectral com diferentes características (LiDAR, multiespectral, hiperespectral, infravermelha, térmica ou visível) e implementação de algoritmos complexos para deteção e segmentação da frente de fogo e correção e georreferenciação de imagem.

Em contraste com os métodos tradicionais, como emprego de sentinelas que trabalham em condições de extrema exigência física e psicológica em torres de vigia [3][6], foram estudados e implementados sistemas terrestres de vigilância automáticos como o BOSQUE [7], testado nos campos de ensaio do CEIF, ou a rede de sensores FireWatch [3] instalada na floresta de Brandenburg, Alemanha, a qual realiza deteção de plumas de fumo. O uso destes sistemas tem como desvantagens o reduzido campo de ação e a restrição do alcance de visão pelo relevo e vegetação, além de estarem completamente expostos à ação do incêndio. [8][9]

O desenvolvimento e uso de satélites é frequente nos países tecnologicamente mais avançados. São exemplos o EOS-AM Terra lançado pela NASA, o qual usa o sensor MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer), e o microssatélite BIRD lançado pelo Centro Aeroespacial Alemão em 2001. [10][8] No entanto, os ciclos orbitais e a baixa resolução espacial e temporal da imagem adquirida pelos satélites limitam a sua transmissão em tempo real, além do fogo ser apenas detetado após atingir uma determinada dimensão. [11]

A alternativa de eleição é o uso de meios aéreos. O United States Forest Service (USFS) foi pioneiro neste campo, ao realizar ações com aviões tripulados durante a década de 20 para registo manual dos focos e contornos das frentes de incêndio em mapas, fornecendo a informação aos órgãos de decisão após aterragem. [12] Com efeito, o uso de meios aéreos tem diversas vantagens. Um reconhecimento aéreo próximo limita a subjetividade da informação proveniente dos comandantes e das unidades distribuídas localmente no terreno, melhorando a coordenação dos recursos disponíveis, além de ultrapassar o problema da orografia, que causa obstrução visual direta. [13] A capacidade de alterar o ângulo de captação, a altitude, o tempo de aquisição, além da flexibilidade em alterar percursos ou mesmo a totalidade da missão, torna-os ativos valiosos. [11] No entanto, o uso de meios aéreos tripulados significa pôr em risco a sua tripulação em missões extremamente exigentes a nível de resiliência física e psicológica, existindo também limitações em termos de tempo de voo e mobilidade aérea devido à proximidade ao fogo. [14] Além disso, são também impostas restrições ao voo tripulado durante e após o pôr do sol ou ainda na presença de colunas densas de fumo ou geral má visibilidade. [15][16]

A solução passa pela implementação de sistemas aéreos não tripulados. Além de outras vantagens, o uso destas plataformas permite anular o custo político e humano, aumentando assim a probabilidade de sucesso da missão. [14] O United States Forest Fire Laboratory (USFS), realizou em 1961 o primeiro estudo documentado do uso de VANTs em um incêndio florestal, o qual tinha o objetivo de medir parâmetros meteorológicos. [12] Apenas em 1996 foram realizadas novas experiências com adaptação de tecnologia de captação de imagem infravermelha e visível. [17] A falta de regulamentação, operacionais treinados e referências em missões reais, fizeram com que estes sistemas não fossem devidamente implementados ou difundidos. [15] Foi apenas após o investimento realizado na década de 90 pelo Departamento de Defesa dos Estados Unidos da América (DoD) (o

qual permanece ainda em crescimento), com a finalidade de desenvolver sistemas aéreos não tripulados para fins militares, que começaram a existir oportunidades no setor civil. [14] [15] Logo começaram a surgir os primeiros estudos fora de território norte americano. Nos subcapítulos seguintes apresentam-se três casos de estudo distintos que representam o estado da arte no campo de aplicação de VANTs em incêndios florestais no hemisfério ocidental.

2.2. Casos de Estudo

2.2.1. NASA Ikhana UAS

Nos Estados Unidos da América, a experiência adquirida através de projetos como o FiRE e Wildfire Research and Applications Partnership (WRAP) permitiram a realização de experiências concretas com recurso a VANTs em incêndios florestais. [11][18] Estes projetos pretendiam não só maturar as tecnologias de aquisição de imagem térmica e de transmissão da informação, como também estudar as diretivas necessárias para operação segura e eficiente de VANTs em ambiente de incêndio florestal. [11][15][14] Em 2006, no âmbito da Western States UAS Fire Imaging Mission (WSFM), foram adquiridos pela NASA dois VANTs General Atomics MQ-9 denominados de Altair e Ikhana (**Figura 2.1**), cujo principal objetivo era a adaptação de sensores utilizados em satélites, nomeadamente o sensor AMS (Autonomous Modular Scanner), representado na **Figura 2.2**, para missões de deteção e monitorização de incêndios florestais. [19]



Figura 2.1: Ikhana com o sensor AMS colocado na parte inferior da asa esquerda (retirado de [17])

Com destaque no Ikhana, este VANT é capaz de realizar voos com duração superior a 24h a altitudes até 45000'. A sua alta autonomia energética permite a realização de pernas de voo com mais de 7400km de comprimento. Tem também capacidade de estabelecer comunicações *beyond visual line of sight* (BVLOS) com a estação de controlo, servindo ainda de relé de comunicação entre vários órgãos terrestres. O sensor AMS foi configurado para captação em dezasseis bandas nas regiões visível e infravermelho de onda curta (SWIR), média (MWIR) e térmica (TIR), sendo capaz de distinguir temperaturas dos 0K a 850K, com precisão de 0.5K. A imagem é processada a bordo do VANT de forma a gerar imagens multiespectrais georretificadas e ficheiros com a localização dos focos de incêndio. Esta informação é transmitida em tempo quase-real, existindo um atraso somente de 5 a 10 minutos devido ao processamento da imagem realizado a bordo da aeronave. [20][17]

Durante os incêndios que deflagraram no estado da Califórnia em 2008, o Ikhana realizou um total de cinquenta e seis horas sobre vinte incêndios (a altitudes compreendidas entre os 23000' e 25000') em voos para aquisição de imagem térmica, auxiliando ainda equipas de reabilitação de ecossistemas após a extinção dos fogos. O uso do VANT permitiu visualizar o fogo através de plumas densas de fumo, ajudando em operações de alocação de recursos, resgate de pessoal e avaliação da eficácia do combate ao incêndio.

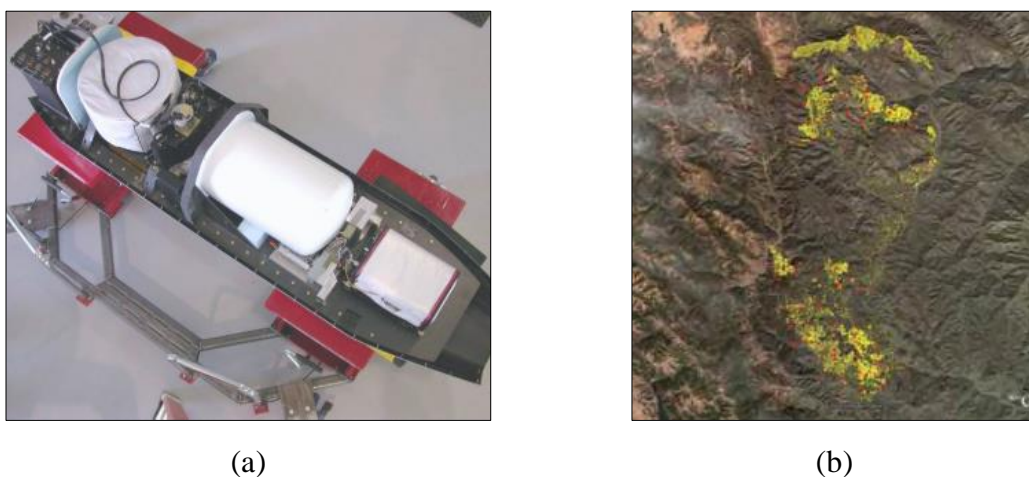


Figura 2.2: Sensor AMS modificado para missões a bordo do Ikhana (a) (retirado de [20]) e comparação de focos detetados a partir do sensor MODIS a bordo do satélite EOS-AM Terra (vermelho) com o detalhe dos focos detetados pelo sensor AMS a bordo do Ikhana (amarelo) (b) (retirado de [17])

A imagem recolhida através do Ikhana nessas ocorrências mostrou conter mais detalhe que aquela adquirida através de satélites, visível na **Figura 2.2**. [17] Este projeto teve também o mérito de ser o primeiro a receber certificado de autorização (COA) à operação alargada em espaço aéreo nacional, sem necessidade de escoltas ou observadores, sendo a primeira vez que um VANT realiza missões de forma regulamentar no âmbito dos incêndios florestais. [17]

2.2.2. Integrated Vegetation Fire Management

Em 2004 o Szendro Fire Department, Hungria, liderou o projeto Integrated Vegetation Fire Management, através do qual se realizou a primeira missão regulamentar europeia na monitorização de incêndios florestais. Este departamento utiliza pequenos VANTs multi-rotor de classe I com tecnologia *off-the-shelf*, em operações rápidas de aquisição de fotografia aérea (visível) em ocorrências que não justificam a utilização de meios aéreos tripulados. [13] A **Figura 2.3** mostra exemplos da imagem recolhida durante este projeto. Apesar de não serem usados sensores térmicos durante as missões, este estudo tem relevância no sentido de concluir que para a informação ser relevante, a operação deste tipo de VANT (perfil tático) deve ser cedida aos operacionais no terreno.



Figura 2.3: Exemplos de imagens recolhidas durante missões realizadas com VANTs pelo *Szendro Fire Department* (retirado de [13])

2.2.3. Projeto Sky Eye

No ano de 2009 começa a ser conceptualizado na Universitat Politècnica de Catalunya uma plataforma aérea de asa rotativa de classe I para monitorização autónoma durante e após o incêndio, no âmbito do projeto Sky Eye. O objetivo é a adaptação de equipamento *off-the-shelf* de forma a que possa ser mobilizado diretamente a partir do terreno, usando arquiteturas de sistema sofisticadas e implementando algoritmos avançados para deteção, segmentação e fusão de imagem. [21] A **Figura 2.4** mostra imagens que exemplificam a aplicação da plataforma em ensaios controlados, no entanto, informação específica sobre o equipamento usado é escassa. O Sky Eye surge no seguimento de outros projetos realizados através da cooperação dos autores deste projeto, nomeadamente o projeto COMETS [19][20]. Apesar de não ter aplicação prática real, é um dos mais recentes e completos projetos realizados em continente europeu dentro da temática dos incêndios florestais.

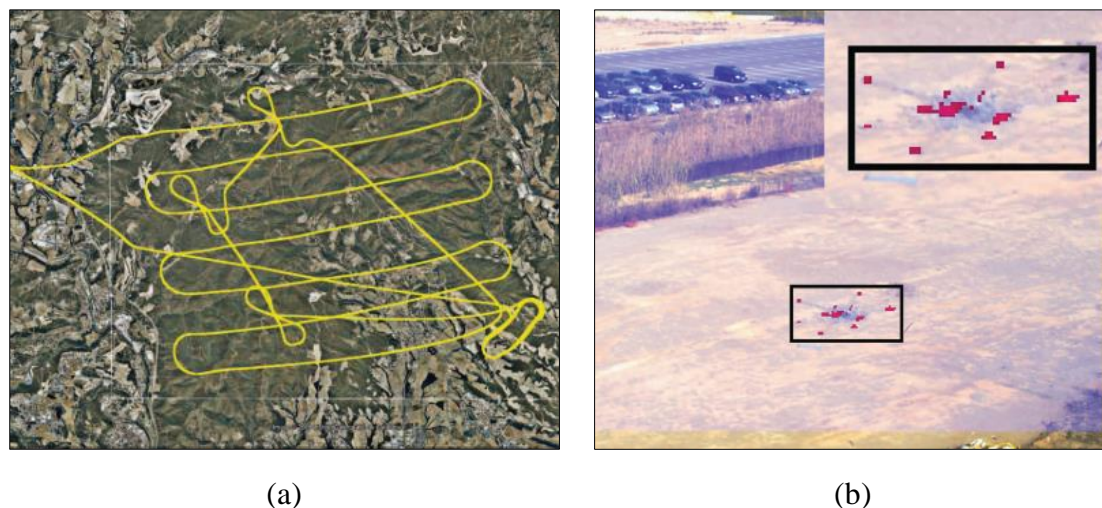


Figura 2.4: Padrão de voo automático realizado num teste de voo do projeto Sky-Eye (a) e imagem de deteção de foco de incêndio através de fusão de imagem visível e infravermelha (b) (retirado de [21])

2.3. Notas Finais

Após análise dos vários projetos inseridos nesta temática foi possível concluir que existem duas abordagens dominantes à aplicação dos VANTs: estratégica e tática, sendo que a classe, modo de sustentação e autonomia energética do VANT, estão diretamente relacionadas com a tipologia da missão.

2.3.1. VANTs de Perfil Estratégico

Por um lado, são usados VANTs de grandes dimensões, de classe II ou III (de acordo com classificação proposta pela NATO [22]), em missões de reconhecimento para recolha intensiva de informação sobre uma ou várias frentes ativas. Estas são caracterizadas por um **perfil estratégico**, como é o caso dos projetos realizados nos Estados Unidos da América, sendo exemplos o FiRE (Altus II) e WSFM (Ikhana e Altair). Os VANTs são equipados com sensores, sistemas de comunicação e acessórios auxiliares sofisticados, de forma a realizar de missões de longa duração a altitudes elevadas. Estas características restringem o modo de sustentação da aeronave à asa fixa, impedindo captação de imagem de forma estática. No entanto, as funções que um VANT de perfil estratégico pode desempenhar são muito variadas, podendo atuar em qualquer uma das fases de desenvolvimento de uma ocorrência.

Numa fase preliminar, podem ser usados para estimar mapas de risco e de vegetação com recurso a sistemas LiDAR por exemplo (necessários para ferramentas de simulação e previsão de comportamento de incêndios). A monitorização da floresta permite detetar a formação de novos focos de incêndio, captando imagens que possam clarificar a sua causa.

Após a deteção de um foco de incêndio, podem participar em operações de monitorização da evolução do incêndio, adquirindo dados meteorológicos e registando a evolução do fogo a partir de posições privilegiadas. Torna-se possível observar eficazmente situações potencialmente fatais para os bombeiros, como a convergência de frentes de fogo, ou a origem de focos secundários perto da zona de combate. Pode ainda ser observada e relatada a posição exata dos recursos materiais e humanos envolvidos no combate e determinar se o fogo está a ser contido de forma eficaz. A medição e cruzamento de informação meteorológica no local do incêndio como, por exemplo, correntes convectivas e velocidade do vento, pressão, humidade relativa e temperatura, são dados não apenas

importantes durante uma ocorrência, tendo também valor científico, ajudando na compreensão do comportamento do fogo.

A monitorização da área ardida ajuda a prevenir reacendimentos decorrentes da presença de brasas subterrâneas ou superficiais, auxiliando nas decisões acerca da alocação de recursos terrestres que podem ser necessários em frentes ativas. [21] A informação recolhida nesta fase pode auxiliar na contabilização dos danos sociais, económicos e ecológicos causados pelo fogo, e na apreciação das decisões tomadas durante uma determinada operação. [17]

Além das funções já descritas, os VANTs podem desempenhar funções de relés de comunicação em ambientes complexos, onde a topografia limite as transmissões de rádio entre as equipas de bombeiros e as equipas de comando. Como nota final, um dos maiores desafios neste campo tem sido a gestão do espaço aéreo de forma a acomodar VANTs e aeronaves tripuladas de forma segura. Aponta-se ainda como desvantagem a necessidade de pistas ou equipamentos para lançamento e recolha da aeronave, como o representado na **Figura 2.5**. [14]

2.3.2. VANTs de Perfil Tático

Na maioria dos projetos europeus, como por exemplo os referidos projetos COMETS e Sky Eye, ou ainda o projeto “1st” – FIRST [23] (**Figura 2.5**), aplicam-se equipas de VANTs em estilo coordenado e cooperativo ou, por outro lado, de forma individual, em missões caracterizadas por um **perfil tático**. Exemplos deste tipo de aplicação em cenário real são o caso do Szendro Fire Department, onde a aquisição de informação é realizada com grande proximidade ao evento. Neste caso, a tecnologia é restringida, permanecendo apenas o que é estritamente necessário de forma a fornecer às equipas de comando o mínimo de informação que permita o sucesso da missão. No geral opta-se por uma plataforma que seja mobilizada rapidamente a partir do terreno pelos operacionais, e que seja fácil e rapidamente substituível em caso de dano catastrófico. Normalmente nesta aplicação são usados VANTs de asa rotativa de classe I. Isto significa que o teto operacional da aeronave e autonomia energética de voo são reduzidas, impedindo a monitorização de áreas de grande dimensão. Nalguns casos poderá usar-se VANTs de asa fixa, no entanto para o processo de descolagem são muitas vezes necessários aparatos como o representado na **Figura 2.5**.

Com efeito, o campo mais adequado de atuação destes VANTs nos incêndios florestais restringe-se a situações de emergência onde é necessário recolher uma informação específica de forma a tomar uma decisão imediata pelas equipas de bombeiros. No entanto é necessário um agente treinado para o operar, uma vez que o controlo é manual e a proximidade com o fogo incita à experiência na pilotagem do VANT.



Figura 2.5: VANT de asa fixa e de perfil tático, INSITU SCAN EAGLE com equipamento auxiliar de descolagem (a) (retirado de [14]) e VANT usado no projeto “1st” – FIRST (retirado de [23]) (b)

Durante uma operação de grandes dimensões, se vários VANTs trabalharem cooperativamente, cada um pode incluir a bordo diferentes tipos de sensores de forma a complementar informações ou imagens, as quais podem ser fundidas na estação de controlo (GCS), compensando-se assim a reduzida autonomia energética dos VANTs. Conclui-se que os VANTs de perfil tático ajudam a descentralizar conscientemente a tomada de decisão.

3. PREMISSAS DO ESTUDO

A metodologia a desenvolver para realização de ensaios de campo tem o principal objetivo de concluir acerca da influência exercida pela distância do sensor à frente de fogo (*working distance*) na precisão da identificação da frente de fogo e do cálculo de alguns parâmetros característicos do fogo. Neste capítulo referem-se as premissas que iniciaram o processo de desenho dos ensaios de campo, bem como a necessidade da realização deste estudo. Com efeito, independentemente do sensor utilizado, aquando da aquisição de imagem infravermelha, a atmosfera constitui uma barreira à radiação que viaja da fonte (fogo) ao sensor, resultando em perda de informação. Esta permeabilidade da atmosfera varia para diferentes regiões do espectro radiativo. Assim definem-se janelas atmosféricas como sendo gamas de radiação para as quais a atmosfera apresenta permeabilidade elevada. Além disso, podem existir outros efeitos que, **não dependendo da distância ao alvo de medição**, podem ter influência na precisão com a qual a informação chega ao sensor, como por exemplo a existência de radiação refletida. Os vários fatores que podem ter influência na aquisição térmica e nos resultados são descritos com maior profundidade no capítulo 4.8.



Figura 3.1: VANT OGASSA OGS42, fabricado por UAVision (retirado de [24])

Com o **desenho de ensaios de campo** pretende-se simular uma missão de aquisição de imagem infravermelha em ambiente de incêndio florestal. No entanto, enquanto que num incêndio florestal o VANT não é levado a captar a totalidade da frente, durante o ensaio de campo pretende-se captar a totalidade da frente de uma forma consistente e rigorosa. Sabe-se à partida que deverá ser utilizado um VANT de perfil estratégico OGASSA OGS42 (**Figura 3.1**), a ser fornecido e operado pela FAP, para aquisição de imagem infravermelha durante os ensaios. Existe ainda uma opção de reserva, a qual consiste numa aeronave civil, Cessna 172N, a ser cedida pelo ACTV (**Figura 3.2**). Esta última equipar-se-á, se necessário, com um sensor de infravermelhos a definir. O sensor (*gimbal*) a bordo de qualquer uma das aeronaves deverá ter mobilidade de rotação horizontal e vertical. Estão programados sete ensaios com fogo experimental, durante os quais seria possível realizar voos a diferentes patamares de altitude para aquisição de imagem térmica.

Durante a realização dos vários ensaios, conta-se com a presença de um VANT (de reduzidas dimensões), propriedade da ADAI, o qual deverá realizar aquisição de imagem visível, fornecendo uma outra perspetiva dos ensaios.



Figura 3.2: Cessna 172n propriedade do Aero clube de Torres Vedras [25]

4. DESENHO DE ENSAIOS DE CAMPO

Apesar da ANEPC ter disponível para consulta um conjunto de normas para trânsito de aeronaves bombardeiras de e para zonas de incêndio, detalhes sobre as diretivas usadas durante missões de monitorização e operação de cargas sensoriais não são divulgadas por nenhum membro ou órgão da ANEPC. Considerando o veículo usado nos ensaios, foi necessário proceder a uma análise crítica acerca da forma como os voos seriam conduzidos. O conjunto de regras e pressupostos gerados baseiam-se essencialmente na legislação de navegação aérea em vigor, limitações da plataforma aérea utilizada, orografia do local e algumas especificidades relativas aos incêndios florestais. Nos subcapítulos seguintes são desenvolvidos os pontos que ajudaram no desenvolvimento de uma folha de cálculo cuja principal função é devolver um padrão de voo com base num conjunto específico de *inputs*. Esta folha é descrita com maior rigor no anexo A.

4.1. Local dos Ensaios

O local dos ensaios situa-se na região da Gestosa, Serra da Lousã, junto ao parque eólico LOUSÃ II (detido pela empresa Parque Eólico de Trevim, Lda). Na **Figura 4.1** representa-se uma fotografia aérea do local. Foram realizados um total de sete ensaios, em parcelas distintas, representadas na **Figura 4.2**, nas quais diferentes tipologias de frente de fogo foram simuladas. Estas encontram-se numa encosta a és-sudeste, assumindo-se um declive médio de cerca de **15°** para todas as parcelas.

Tabela 4.1: Detalhes acerca dos ensaios realizados na Gestosa

Hora de queima	Parcela/Ensaio	Tipologia da frente e teste	Área [m ²]
10h00	Gest2019_01	1 frente (proteção de cabine)	1377.5
10h45	Gest2019_02	1 frente (barreira)	1341
11h30	Gest2019_04	1 frente (edifício)	2312.52
12h15	Gest2019_03	2 frentes convergentes (Pedrogão Grande)	2532.11
13h00	Gest2019_06	2 focos pontuais	1156.56
13h30	Gest2019_07	1 frente (SAP Drone)	785.89
14h45	Gest2019_05	Focos aleatórios (Aguilheta Inteligente)	2171.14

Para se estimar a altitude máxima no local dos ensaios, essencial para garantir condições de segurança no voo, tiveram-se em consideração as dimensões somadas das pás e torre das turbinas presentes no local, aproximadamente $130m$, e a altitude máxima da região, o Alto do Trevim, situado a uma altitude $1195mASL$. Desta forma estima-se que o ponto de altitude máxima na região dos ensaios seja de $1325mASL$ ($4350'ASL$), o qual se encontra num raio de $1.5km$ ao local das parcelas.



Figura 4.1: Fotografia aérea das parcelas, tirada com o VANT da ADAI



Figura 4.2: Detalhe da localização e dimensões das parcelas dos ensaios realizados no dia 15 de Maio

Na **Tabela 4.2** e **Tabela 4.3** estão discriminadas as coordenadas dos vértices principais das parcelas, além do ponto médio do seu limite superior e altitude. Estes dados são referências à definição de *waypoints* do padrão de voo estabelecido para cada parcela, usados na folha de cálculo elaborada para o propósito.

Tabela 4.2: Coordenadas dos quatros vértices delimitadores das parcelas

Vértice	1		2		3		4	
Parcela	Northing [mN]	Easting [mE]	Northing [mN]	Easting [mE]	Northing [mN]	Easting [mE]	Northing [mN]	Easting [mE]
Gest2019_01	4435275.7	571582.4	4435298.9	571602.5	4435317.5	571552.6	4435293.6	571540.3
Gest2019_02	4435295.3	571536.0	4435318.9	571547.9	4435341.3	571498.2	4435316.3	571487.2
Gest2019_03	4435241.1	571552.9	4435271.0	571577.6	4435309.9	571484.5	4435269.4	571476.5
Gest2019_04	4435206.4	571524.9	4435234.0	571546.5	4435260.1	571475.2	4435225.6	571468.7
Gest2019_05	4435162.5	571500.3	4435201.7	571520.8	4435220.5	571467.7	4435176.4	571459.9
Gest2019_06	4435131.0	571484.1	4435158.2	571498.4	4435172.0	571457.3	4435144.1	571450.3
Gest2019_07	4435103.0	571461.5	4435124.9	571478.3	4435135.8	571447.9	4435112.1	571435.7

Tabela 4.3: Informação das parcelas para auxílio na elaboração dos planos de voo

Parcela	Ponto médio do limite superior		Altitude ASL do limite superior [m]
	Northing [mN]	Easting [mE]	
Gest2019_01	4435287.02	571592.22	1080
Gest2019_02	4435307.11	571541.96	1061
Gest2019_03	4435255.98	571565.37	1077
Gest2019_04	4435220.76	571536.25	1074
Gest2019_05	4435181.84	571508.52	1073
Gest2019_06	4435144.81	571491.11	1071
Gest2019_07	4435113.82	571469.82	1070

4.2. Variáveis e Parâmetros do Estudo

A escolha de variáveis independentes que se irão fazer variar durante os voos deve ser reduzida, de forma a que a relação de cada uma delas com a precisão dos parâmetros seja o mais objetiva possível. Optou-se por definir o ângulo de captação, calculado relativamente à vertical, e distância do sensor ao centro geométrico da parcela (*working distance*) como as variáveis independentes no estudo, no entanto, com maior foco na *working distance*. De facto, devido à distância a que o sensor se posicionará em relação à frente de fogo, o ângulo não deverá representar grande influência nos resultados. A conjugação destes dois parâmetros traduz-se na altitude de voo, a qual tem particular importância por ser um dos principais intervenientes na gestão do espaço aéreo e da segurança em voo.

Através da deteção e identificação da frente de fogo em instantes discretos durante um ensaio, podemos caracterizar a frente de fogo através de alguns parâmetros [26], nomeadamente:

- $R [m/s]$ – Velocidade instantânea de propagação da frente de fogo;
- $\bar{R} [m/s]$ – Velocidade média de propagação da frente de fogo;
- $I [kW/m]$ – Intensidade de propagação.

A determinação da velocidade instantânea de propagação possibilita o cálculo da intensidade de propagação, a qual traduz a dimensão do ensaio. Este parâmetro tem particular importância, ao servir de referência para avaliação dos meios de intervenção adequados para combate ao fogo, apoiando desta forma a tomada de decisão no terreno.

A precisão da imagem aérea, relativamente à *working distance* (distância do sensor à parcela), será estimada através do cálculo do desvio entre os parâmetros calculados a partir da imagem aérea e de controlo, individualizando os resultados para cada patamar de altitude realizado pelo VANT.

4.3. Determinação da Gama de Altitudes de Voo Regulamentares

Como já referido, a altitude de voo é estabelecida em função da inclinação do sensor e da sua distância à frente de fogo. De modo a proceder à escolha apropriada destas duas variáveis para cada ensaio, e considerando que estes seriam realizados por uma aeronave militar não tripulada de classe I ou II (de acordo com a classificação proposta pela NATO [22]) ou uma aeronave tripulada civil, é necessário conhecer a legislação vigente para voo em *visual flight rules* (VFR) dentro de espaço aéreo GOLF (espaço aéreo não controlado). Para o efeito consultou-se o manual de VFR publicado pelos Serviços de Informação Aeronáutica (NAV - AIS) conjuntamente com a legislação aeronáutica divulgada pela Autoridade Nacional da Aviação Civil (ANAC). [27] Como regra geral as aeronaves não tripuladas (a partir de 900g) seguem a mesma legislação definida para aeronaves tripuladas. [28]

Dado que um dos objetivos do projeto FIREFRONT é a aquisição de imagem durante a fase de combate ao incêndio, foi também necessário consultar o Manual Operacional de Meios Aéreos da ANEPC [16], o qual considera o uso de aeronaves bombardeiras. Além disso existem ainda alguns requisitos específicos da missão de monitorização da frente de fogo, que apesar de não obrigatórios, são desejáveis.

O cumprimento da legislação proposta pela ANAC e ANEPC é particularmente importante no caso de se utilizarem aeronaves civis na missão de monitorização. No caso do VANT, a Força Aérea tem o poder de moldar o espaço aéreo às suas necessidades. De forma geral, para estabelecimento da altitude mínima, seguem-se as seguintes imposições:

1. *Mínimo de 500' AGL ou ASL*: Uma aeronave não deve operar abaixo de 500' em qualquer situação normal durante um voo em VFR;

2. *Altitude AGL delimitada pela presença de obstáculos:* Nessa situação este deve voar a uma altitude de segurança acima do acidente geográfico ou obstáculo mais elevado. No âmbito da realização de ensaios de campo, será cumprida a seguinte premissa: “*Nos voos em que a aeronave se encontra em contacto visual com o aeródromo, não excedendo uma distância de 8km do ARP (aerodrome reference point) durante todas as fases de voo, a aeronave deve manter uma distância de 1000’ acima do obstáculo mais alto, num raio de 600 metros à sua volta.*” [27] Tendo em conta que as eólicas representam o obstáculo mais elevado, esta regra impõe um mínimo de 1630mASL, ou 5350’ ASL, na região dos ensaios.
3. *Altitude que garanta condições de visibilidade mínima:* No caso de voo tripulado, em condições de VFR em espaço aéreo não controlado, considerando a presença de obstáculos como acidentes topográficos, é ainda necessário considerar a legislação relativa à visibilidade horizontal:
 - a) Abaixo FL100 até 3000’ ASL ou 100’ acima do terreno (o que for mais alto):
 - 5 km Visibilidade;
 - 1500m horizontal e 300m de distância vertical às nuvens.
 - b) 3000’ AMSL e abaixo ou 1000’ acima do terreno (o que for mais alto):
 - 5km livre de nuvens e com terra ou água à vista.
4. *Altitude delimitada pela presença de correntes aerodinâmicas:* Em zonas de terreno acidentado, como no caso de serras, geram-se fortes correntes aerodinâmicas as quais causam forte turbulência. Estas condições podem-se revelar particularmente perigosas durante o voo. Cabe ao operador da aeronave avaliar as condições atmosféricas, tomar a decisão sobre a execução do voo e avaliar qual a altitude mínima de segurança;
5. *Mínimo de 1500’ AGL:* Quando existirem aeronaves bombardeiras, as operações de monitorização devem de ser realizadas fora do espaço aéreo vertical a elas destinado, evitando constrangimentos a ambas as missões e garantindo a segurança das aeronaves. O teto máximo de operação das aeronaves bombardeiras são 1500’AGL. Esta é também uma das principais razões pelas quais a maioria das operações reais se realizam com VANTs de asa fixa, os quais, tendo em conta a autonomia energética, têm maior facilidade em voar a altitudes

elevadas. Na região dos ensaios, tendo em conta apenas a elevação topográfica do local, esta regra impõe um mínimo de 1650mASL, ou 5420'ASL.

Como os ensaios simulam um incêndio real, é ainda desejável que as altitudes escolhidas para os voos tenham em consideração os seguintes pontos:

6. *Altitude deverá permitir no mínimo 1 km² de área de captação no solo:* Os focos secundários originam-se recorrentemente a distâncias entre 1 e 2km da frente de fogo. [26] A altitude AGL deve ser tal que permita a visualização da génese destes focos, de modo a existir uma maior *situational awareness*. A formação de focos secundários pode efetivamente ter a sua génese a dezenas de quilómetros da fonte. No entanto, de modo a garantir maior segurança dos bombeiros, é essencial detetar a génese destes focos perto da zona de combate.
7. *Os pontos de referência deverão ser captados em todos os instantes de aquisição:* Durante a realização de um ensaio de campo a existência de pontos de referência permite a referenciação geográfica e ortogonalização da imagem nos estágios de análise de imagem.

A análise destes pontos permite concluir que a altitude não deverá ser inferior a 1500'AGL (ponto 5), o que significa um mínimo de 1652mASL, ou 5420'ASL, na região dos ensaios. O cumprimento deste ponto garante os pontos 1 e 2. Os pontos 3 e 4 são dependentes das condições atmosféricas e como tal devem ser discutidos com a equipa de voo durante os momentos de *briefing*, sendo que a altitude mínima poderá ser superior à indicada. O ponto 6 depende fundamentalmente das características do sensor escolhido.

Em termos de legislação, não existe teto máximo para a operação de aeronaves, dado que o espaço aéreo fica interdito em caso de incêndio florestal. No entanto, é desejável concluir acerca da altitude máxima a partir do tratamento de dados da imagem térmica recolhida durante os ensaios de campo, a qual deverá ser delimitada pela:

8. *Intensidade mínima captável:* Determinante para a deteção de focos secundários, a altitude não deve ser superior àquela que incapacite a captação de um incêndio com 3 a 4m² de área no terreno. Este estudo não foi conduzido para o presente trabalho.

9. *Precisão mínima na extrapolação de parâmetros do fogo:* No âmbito do projeto, a condicionante mais relevante na definição da altitude máxima AGL de voo é a precisão da extrapolação das características do fogo a partir dos dados recolhidos na plataforma aérea. Este ponto constitui o foco do estudo da presente tese. A precisão dos parâmetros e, especialmente da localização da frente de fogo, deve ser tal que seja possível utilizar a imagem para alimentar um sistema de previsão da frente de fogo.

A gama de altitudes AGL em que a missão é viável para um determinado sensor específico, resulta da conjugação dos fatores que determinam a altitude mínima e a altitude máxima.

4.4. Posicionamento da Aeronave Relativamente à Frente de Fogo

O correto posicionamento da aeronave relativamente à frente de fogo permite a redução da probabilidade de descarte de imagens devido a oclusão da frente. Desta forma apontam-se dois fatores importantes a ter em conta:

- Presença e comportamento da coluna de fumo gerada e da sua interação com o vento;
- Presença de obstáculos físicos à captação de imagem térmica.

4.4.1. Coluna de Fumo

O posicionamento da aeronave relativamente à frente de fogo deve ser feito tal que a aeronave permaneça livre de interação com a coluna de fumo produzida no incêndio, de forma a não comprometer a segurança da aeronave devido a má visibilidade ou incursão em prejuízos materiais, uma vez que as partículas de fumo causam mau funcionamento de motores de combustão e danificação dos seus componentes. [15]

A previsão do comportamento da coluna de fumo é uma tarefa complexa não existindo, até à data, informação que permita realizar essa estimativa de forma integral. [29] O estudo da influência destes parâmetros está para além dos objetivos deste trabalho. No entanto, referem-se de seguida alguns pontos importantes.

A localização da coluna de fumo é função de muitos parâmetros, incluindo a topografia e estabilidade atmosférica. No entanto, esses parâmetros têm influência direta no balanço entre a intensidade do fogo e da intensidade, direção e perfil de vento. Este é o balanço que verdadeiramente define a localização da coluna de fumo. [30]

Durante a fase nascente de um incêndio a sua intensidade é potenciada nomeadamente pela existência de declive, perfis de combustível florestal favoráveis (i.e., baixo teor de humidade, abundância e elevado conteúdo energético) e existência de vento de superfície. Para que a coluna de fumo suba verticalmente, sem influência do vento, a intensidade do fogo tem de ser tal que exceda a intensidade do perfil de vento. Este cenário leva ao surgimento de *updrafts* que permitem a subida da coluna de fumo de forma vertical. No entanto, a presença de ventos de superfície fortes torna mais difícil a sobreposição da intensidade do fogo à do vento. Assim, a partir de um determinado limite, o vento passa a controlar a velocidade e direção de propagação do fogo. [30]

Em qualquer caso, dado que o objetivo dos ensaios não é gerar um fogo com características tridimensionais, a sua intensidade não deverá ser tal que permita a geração de correntes de vento próprias e sobreposição do seu efeito ao do vento. Desta forma, assume-se que a coluna de fumo terá sempre dispersão na direção do vento. Dado que o vento sopra no sentido ascendente (em relação à encosta) durante o período matinal, a ação do vento soma-se à ação do declive, sendo que a frente de incêndio e a coluna de fumo se irão dispersar encosta acima, pelo que a aeronave se deverá posicionar no lado da área ardida.

4.4.2. Obstáculos Físicos

A presença de vegetação alta ou obstáculos de grandes dimensões pode causar impedimento físico à captação de imagem infravermelha. [31] Apesar de no local dos ensaios não se verificar a existência de vegetação alta, existem torres eólicas, as quais se situam no alto da montanha. Desta forma sugere-se que a aeronave se deva posicionar do lado da área ardida.

Apresentam-se ainda algumas notas breves sobre privacidade. Durante o voo a aeronave deve ser posicionada de forma a que a câmara evite a captação de estruturas ocupadas ou propriedade privada. Dado que os ensaios são realizados num local não habitado, sem estruturas ocupadas ou estradas, não se incorrem em situações passíveis de causar este tipo de problema.

4.5. Padrão de Voo

A grande limitação das aeronaves designadas para a realização dos ensaios de campo são o facto de terem asa fixa, não permitindo a captação de imagem de forma estática. A esta desvantagem soma-se o tempo que demoram a realizar manobras, nomeadamente mudança de altitude, a qual pode ter duração superior à do ensaio ($\sim 10min$). Desta forma, é necessário estabelecer um padrão de voo que permita a aquisição de dados de forma eficaz. Um planeamento do padrão de voo com *waypoints* permite também que o piloto e observador se concentrem nas suas tarefas primárias, evitando a perda de *situational awareness*. [32]

Tendo como base os padrões tradicionais de busca e salvamento realizados com meios aéreos, verificou-se que uma das formas que permite maximizar a recolha de dados num curto espaço de tempo é o padrão de varrimento paralelo (*parallel sweep*). [32] A **Figura 4.3** representa esta hipótese, esquematizando-se também, de forma exemplificativa, o campo de visão da câmara nos pontos médios de cada perna de voo.

Outras hipóteses foram consideradas, incluindo o trajeto circular sobre a frente de fogo e a realização de padrões em oito, com entradas perpendiculares e paralelas à frente de fogo, de forma alternada. No entanto, foram indicados alguns fatores de exclusão destes dois padrões. Além de não ser viável a realização do padrão circular com raio apertado a baixas altitudes, pode-se revelar dificuldade em manter o comportamento do avião estável devido à ação do vento, o que se poderá traduzir em inconsistência no ângulo do sensor relativamente à vertical. O padrão em oito pode revelar perdas de tempo significativas nas voltas, tornando-o impraticável. O padrão de varrimento paralelo, além de ser um padrão simples e familiar a qualquer piloto, contém algumas vantagens decisivas:

- *Garante mais facilmente a estabilidade da aeronave durante a execução das pernas de voo:* A aeronave mantém uma rota estável durante os momentos de aquisição de imagem, garantindo consistência no valor de distância à parcela e ângulo de captação durante a descrição das pernas de voo.
- *Permite uma maior base de dados:* Dado que a aeronave se posiciona sempre do mesmo lado relativo à frente de fogo, a descrição de duas pernas de voo permite duas *working distances* distintas com aplicação de dois ângulos da câmara diferentes. Isto permite maximizar o tempo disponível durante o ensaio de forma a obter dados suficientes que permitam conduzir o presente estudo.

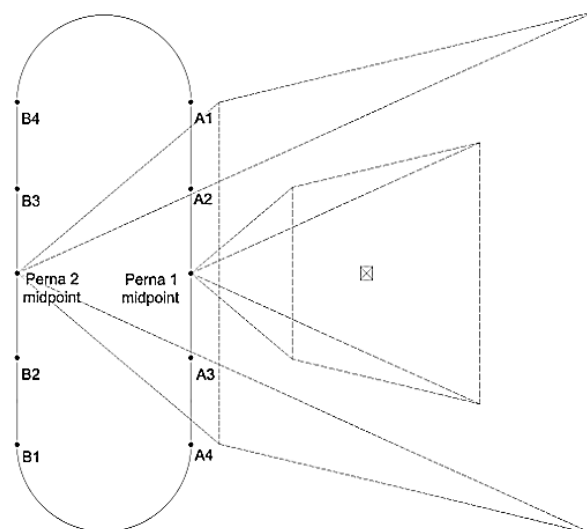


Figura 4.3: Ilustração do padrão de voo em varrimento paralelo (*parallel sweep*) e campo de visão para sensor inclinado em relação à vertical

A principal desvantagem deste padrão é o tempo desperdiçado na realização das voltas entre as pernas de voo. Dada a brevidade dos ensaios (10 a 15min), não é prático existir mudança de altitude, uma vez que esta manobra pode consumir um período de tempo superior ao do ensaio. Além disso seria ainda necessário proceder à estabilização da aeronave e retorno ao padrão de voo. Assim realizou-se apenas um plano de voo por ensaio, nos quais se realiza um patamar de altitude diferente. Estes patamares foram calculados para um afastamento crescente de 1000' em *working distance* entre ensaios, considerando a primeira perna de voo.

O cálculo das coordenadas e restante informação descrita nos planos de voo teve o auxílio da folha de cálculo realizada para o efeito. Optou-se por manter o mesmo ângulo da câmara, relativamente à vertical, para a aquisição de imagem durante a descrição da perna de voo mais próxima da parcela em todos os ensaios. O ângulo que a câmara faz com a vertical durante a segunda perna de voo é calculado pela folha de cálculo em função da distância à parcela.

4.6. Planos de Voo para VANT Estratégico

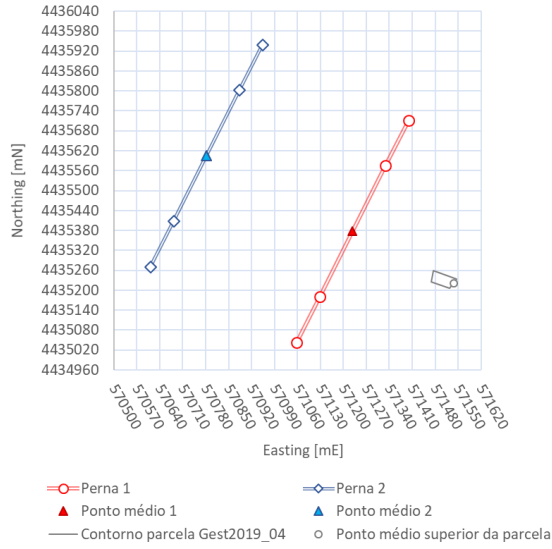
O plano de voo representado na **Tabela 4.4**, apresentada abaixo, está de acordo com a ordem de queima e considera todos os ensaios a ser realizados na Gestosa, excetuando o primeiro e último, Gest2019_01 e Gest2019_05. Os números a sublinhado representam o *input* de *working distance* dado na folha de cálculo para a primeira perna de voo em cada ensaio. Como referido, o ângulo da câmara relativamente à vertical manteve-se constante para a primeira perna de voo de todos os ensaios, com valor de 20°.

Na página seguinte estão representados de forma gráfica os *waypoints* que perfazem os padrões de voo para cada um dos patamares de altitude realizados em cada ensaio (ver **Figura 4.4**)

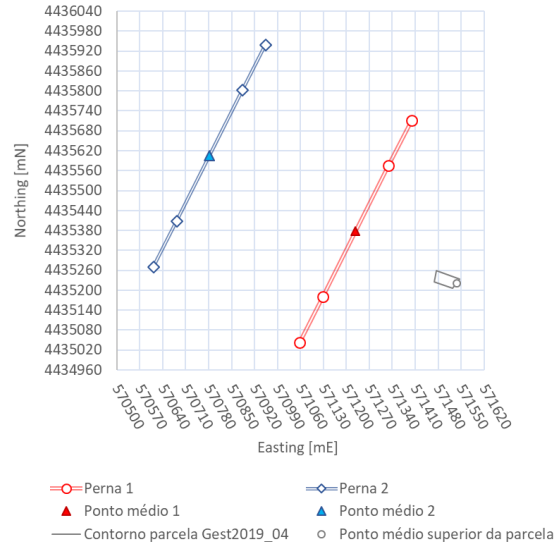
Refere-se que se tiveram em conta as imposições desenvolvidas nos capítulos anteriores, nomeadamente a altitude mínima imposta para descrição do padrão de voo de 5420'ASL, de acordo com o capítulo 4.3. No entanto, de forma a não comprometer os valores de *working distance* estabelecidos, a altitude mínima é inferior em 100' ao valor imposto no capítulo 4.3, o que não deverá à partida revelar nenhum problema.

Tabela 4.4: Planos de voo delineados para os ensaios de campo

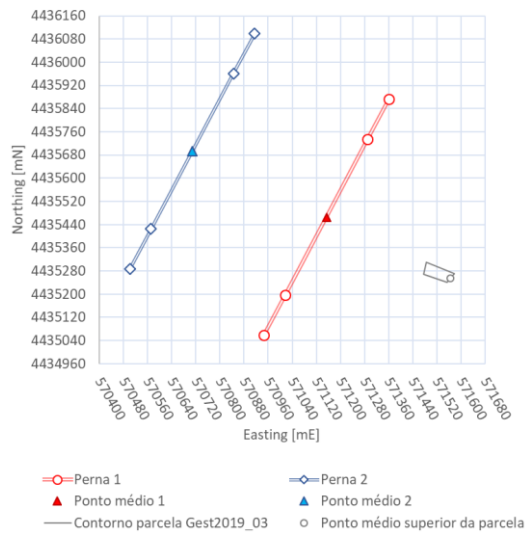
Ensaio	Altitude ASL [ft]	Dist à elevação máx. [ft]	Waypoints	Northing [mN]	Easting [mE]	Ground dist. [m] (ao limite superior da parcela)	Inclinação da câmara [°]	Working dist. [ft]	Área captada [km ²]	
Gest2019_02	5331	951	Leg 1	A1	4435677.4	571472.5	230	<u>20</u>	<u>2000</u>	0.10
				A2	4435539.9	571402.4				
				A3	4435283.3	571271.6				
				A4	4435145.9	571201.5				
			Leg 2	B1	4435373.0	570756.1	730	51.8	2442	0.30
				B2	4435510.5	570826.2				
				B3	4435767.1	570957.0				
				B4	4435904.5	571027.1				
Gest2019_04	6297	1918	Leg 1	A1	4435712.2	571398.7	346	<u>20</u>	<u>3000</u>	0.22
				A2	4435574.7	571328.6				
				A3	4435181.0	571127.8				
				A4	4435043.5	571057.7				
			Leg 2	B1	4435270.7	570612.3	846	44.4	3452	0.45
				B2	4435408.1	570682.4				
				B3	4435801.9	570883.2				
				B4	4435939.4	570953.3				
Gest2019_03	7230	2850	Leg 1	A1	4435872.0	571360.8	462	<u>20</u>	<u>4000</u>	0.39
				A2	4435734.5	571290.7				
				A3	4435197.3	571016.8				
				A4	4435059.8	570946.7				
			Leg 2	B1	4435287.0	570501.2	962	39.9	4461	0.65
				B2	4435424.5	570571.4				
				B3	4435961.6	570845.3				
				B4	4436099.1	570915.4				
Gest2019_06	8196	3816	Leg 1	A1	4435882.9	571258.5	543	<u>20</u>	<u>5000</u>	0.61
				A2	4435745.4	571188.4				
				A3	4435037.2	570827.2				
				A4	4434899.7	570757.1				
			Leg 2	B1	4435126.9	570311.7	1043	36.0	5441	0.89
				B2	4435264.3	570381.8				
				B3	4435972.6	570742.9				
				B4	4436110.0	570813.1				
Gest2019_07	9145	4765	Leg 1	A1	4435975.2	571188.0	642	<u>20</u>	<u>6000</u>	0.88
				A2	4435837.7	571117.9				
				A3	4434973.6	570677.2				
				A4	4434836.1	570607.1				
			Leg 2	B1	4435063.3	570161.7	1142	33.5	6437	1.18
				B2	4435200.7	570231.8				
				B3	4436064.9	570672.5				
				B4	4436202.3	570742.6				



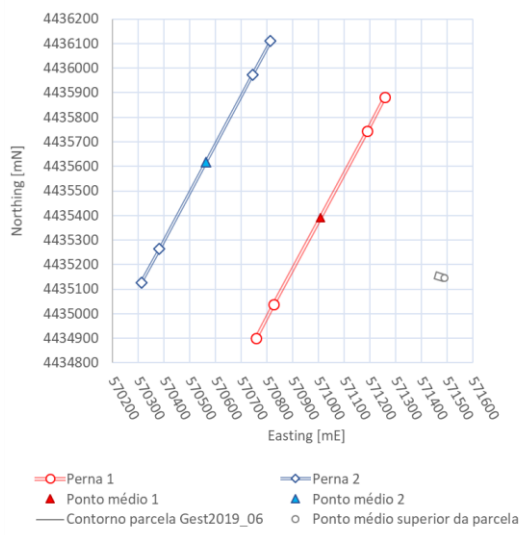
(a)



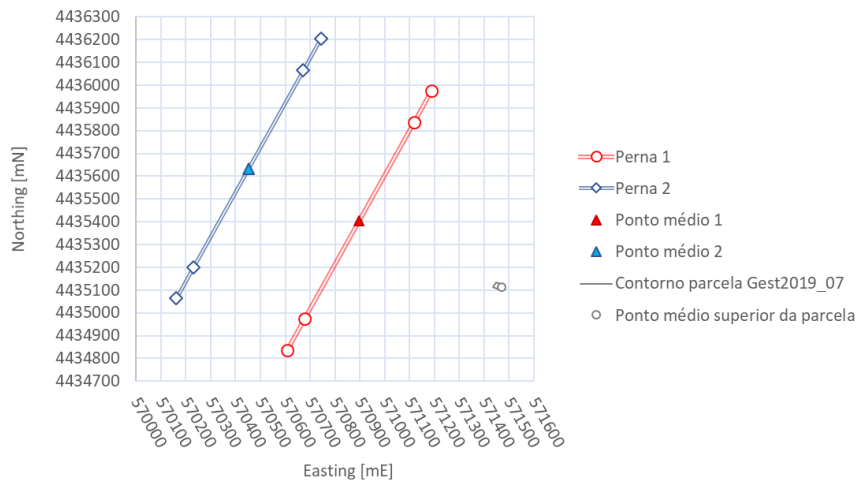
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.4: Gráficos representativos das pernas de voo para os ensaios das parcelas Gest2019_02 (a), Gest2019_04 (b), Gest2019_03 (c), Gest2019_06 (d) e Gest2019_07 (e)

4.7. Planos de Voo para VANT Tático

Devido à impossibilidade da utilização quer da aeronave tripulada (ACTV), quer do VANT (FAP), a aquisição de imagem térmica no dia dos ensaios foi efetuada com recurso a um VANT de cariz tático, DJI Mavic 2 Enterprise Dual. Este foi cedido pela empresa Comercialfoto e operado por um representante da mesma.

Ao contrário do caso anterior, esta aeronave é um *quadrotor* capaz de manter uma posição estática no ar. Dada a sua dimensão, a aeronave não é capaz de suportar ventos fortes como os registados a baixa altitude junto de regiões montanhosas, no entanto é altamente flexível no que diz respeito à mudança de altitude e posicionamento em voo. A mudança de plataforma de aquisição de imagem obrigou à mudança do desenho do ensaio de campo. Realizaram-se apenas dois planos de voo para as parcelas Gest2019_01 e Gest2019_02. A escolha destas parcelas prendeu-se com o facto de serem as primeiras a ser queimadas, de acordo com o plano de ensaios, quando se esperam ventos menos fortes.

De forma a gerar uma base de dados que fosse útil, e de forma a aumentar a confiabilidade dos resultados, optou-se por apenas variar a distância do sensor à parcela nos

vários ensaios, realizando patamares de altitude semelhantes em ambos os ensaios. Tendo em conta a altitude AGL máxima prevista pela legislação para operação de VANT com menos de 900g, os patamares de altitude restringem-se ao valor máximo de 120mAGL. [28]

Mantendo-se a linha de *working distance* a 20°, os patamares são descritos de forma a que sejam incrementados 50' a cada dois minutos de ensaio. Previu-se a realização de sete patamares em cada ensaio, correspondente a um total de quinze minutos de aquisição. Os dois planos de voo estão descritos nas **Tabela 4.5** e **Tabela 4.6**.

Tal como para os planos de voo desenhados anteriormente, a altitude AGL e a *working distance* são medidas para o centro geométrico da parcela.

Tabela 4.5: Plano de voo para o ensaio Gest2019_01 com VANT tático

Teste	Altitude ASL [ft]	Altitude AGL [m] (max=120m)	Working distance [ft]	Dist. à elevação max [ft]	Ângulo da câmara [°]	Easting [mE]	Northing [mN]
1	3489	14	50 (15m)	-891	20	571556.5	4435318.3
2	3536	29	100 (30m)	-844	20	571552.6	4435321.8
3	3583	43	150 (46m)	-797	20	571548.7	4435325.2
4	3630	61	200 (61m)	-750	20	571544.8	4435328.7
5	3677	72	250 (76m)	-703	20	571540.8	4435332.1
6	3724	86	300 (91m)	-656	20	571536.9	4435335.5
7	3771	100	350(107m)	-609	20	571533.0	4435338.9

Tabela 4.6: Plano de voo para o ensaio Gest2019_02 com VANT tático

Teste	Altitude ASL [ft]	Altitude AGL [m] (max=120m)	Working distance [ft]	Dist. à elevação max [ft]	Ângulo da câmara [°]	Easting [mE]	Northing [mN]
1	3427	14	50 (15m)	-953	20	571499.7	4435328.7
2	3474	29	100 (30m)	-906	20	571495.0	4435331.1
3	3521	43	150 (46m)	-859	20	571490.4	4435333.4
4	3568	61	200 (61m)	-812	20	571485.7	4435335.8
5	3615	72	250 (76m)	-765	20	571481.1	4435338.2
6	3662	86	300 (91m)	-718	20	571476.4	4435340.5
7	3709	100	350 (107m)	-671	20	571471.8	4435342.9

O estudo proposto para esta tese não pretende tirar conclusões gerais sobre o uso de câmaras infravermelhas, mas sim acerca de uma plataforma específica, a qual poderia ser usada em missões reais. A utilidade do estudo fica parcialmente comprometida, dado que serão retiradas conclusões acerca de um sensor que não será utilizado em outras missões.

4.8. Problemas Esperados nos Ensaios

A realização de uma experiência em ambiente real significa sujeitar um objeto a condições complexas e dificilmente simuladas a partir de outros métodos (e.g. numérico), pelo que é natural que se revelem comportamentos ou situações inesperadas. A partir da revisão da literatura verificou-se a existência alguns problemas recorrentes durante a operação de VANTs no cenário dos incêndios florestais, os quais são explorados nos subcapítulos seguintes.

4.8.1. Aquisição de Imagem Infravermelha

V.G. Ambrosia e T. Zajkowski [15] apontam as fontes de erro mais comuns durante a captação de imagem térmica aérea com recurso a VANT's, apresentando-se, através destes autores, alguns dos pontos mais relevantes ao estudo em causa:

- a. *Efeitos de radiação solar refletida:* Aquando da captação de imagem em canais de infravermelhos de onda curta, superfícies refletoras como rochas, água ou metal tendem a aparecer como fontes de calor, criando falsos positivos. Este problema pode ser evitado utilizando várias bandas térmicas, aumentando a robustez do sistema. Com efeito, os canais LWIR permitem discernir o terreno do fogo, devido à diferença de temperaturas entre os dois.
- b. *Temperatura da fonte e saturação da imagem:* a temperatura do fogo dita qual a banda térmica que deverá ser usada na aquisição de imagem, sendo que de acordo com a lei de Wien, quanto maior a temperatura, menor o comprimento de onda emitido. A maior parte da energia emitida por incêndios florestais situa-se na região MWIR [$3.0\mu m - 5.0\mu m$] (frente de fogo) e LWIR [$8.0\mu m - 14.0\mu m$] (chamas). Estas gamas encontram-se em janelas atmosféricas favoráveis à sua

captação. A adequada escolha da banda térmica de acordo com a intensidade do fogo, previne fenómenos de saturação na imagem.

- c. *Atenuação devido à absorção de radiação pelos constituintes da atmosfera:* Este é o fator apontado como sendo a razão principal motivadora do presente estudo. Tal como todos os materiais pelos quais se faz passar radiação (e.g.: vidro), a atmosfera terrestre apresenta permeabilidade seletiva à passagem de radiação eletromagnética, a qual é função do comprimento de onda. Apresenta-se na **Figura 4.5** um gráfico representativo das *janelas atmosféricas*.

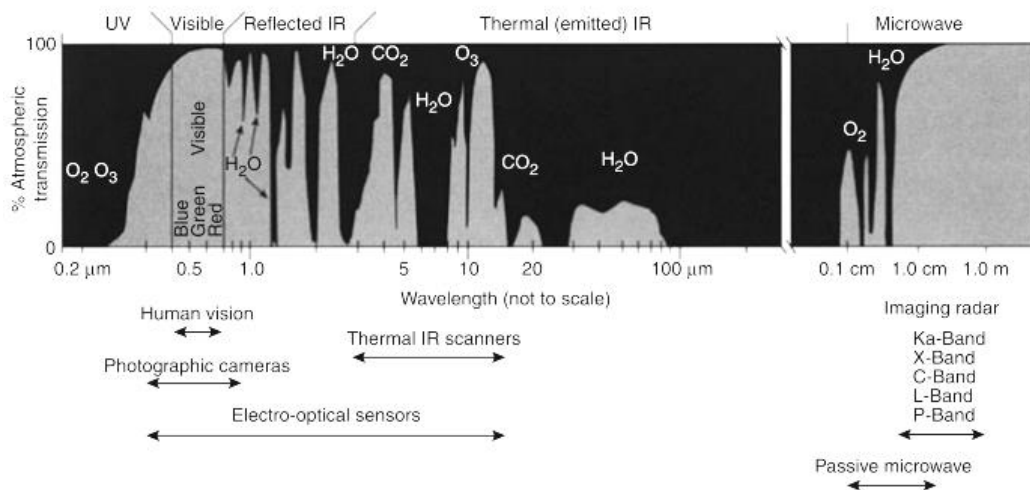


Figura 4.5: Permeabilidade da atmosfera (transmissibilidade), em relação aos diferentes constituintes da atmosfera, e comprimentos de onda da radiação eletromagnética. A título de exemplo, a presença da água na atmosfera não permite a passagem de radiação na região dos $6\mu\text{m}$ a $8\mu\text{m}$ (retirado de [15])

Na **Figura 4.5** pode-se observar que de todos os constituintes da atmosfera, o vapor de água é o que adquire o papel decisivo na absorção de radiação infravermelha NIR (*near infrared* - $0.75\mu\text{m}$; $1.4\mu\text{m}$], MWIR (*medium wave infrared* - [$3\mu\text{m}$; $8\mu\text{m}$]) e LWIR (*long wave infrared* - [$8\mu\text{m}$; $14\mu\text{m}$]). No entanto, a medição otimizada para a captação na região dos $3.9\mu\text{m}$ reduz a variabilidade associada à absorção de radiação pelo vapor de água presente na

atmosfera, reduzindo também a influência da radiação solar refletida em 40%. Como já referido, sensores otimizados para ondas mais curtas tendem a captar a radiação solar refletida e não a energia emitida pelo objeto, incorrendo em falsos-positivos.

- d. *Presença de fumo:* de forma geral, os constituintes do fumo não apresentam um obstáculo à passagem de radiação infravermelha. No entanto, partículas finas presentes na pluma de fumo, decorrentes da queima de matéria orgânica, geram fenômenos de dispersão (*scattering*) de radiação na região NIR.

4.8.2. Funcionamento e Estabilidade da Aeronave

Com efeito, é durante o período programado para a realização dos ensaios que as condições atmosféricas são mais severas. A radiação solar atinge o seu máximo, a humidade relativa é mínima, o combustível florestal está mais seco, a atmosfera está instável, a velocidade do vento é maior e apresenta mudanças de direção mais frequentes. Apesar de ser o momento onde a monitorização é mais importante, é também quando a operação de aeronaves é mais perigosa.

A presença de ventos fortes no momento da realização de ensaios pode apresentar uma condicionante à operação do VANTs táticos de reduzidas dimensões, sendo que a partir de velocidades na ordem dos 30 *km/h* geralmente comprometem a estabilidade da aeronave, impossibilitando a aquisição de imagem.

No caso de serem usadas aeronaves com motores de combustão, os poluentes existentes na pluma de fumo podem causar problemas de funcionamento ou até danificar componentes internos do motor.

Um incêndio florestal pode causar correntes convectivas fortes, que se traduzem na perda de estabilidade das aeronaves, limitando a operação de monitorização sobre a frente de incêndio, principalmente se for usado um VANT tático de reduzidas dimensões. Por outro lado, dada a reduzida dimensão dos presentes ensaios, as correntes convectivas geradas pelo fogo não deverão representar qualquer perigo à estabilidade de aeronaves pesadas.

5. EQUIPAMENTO USADO NOS ENSAIOS DE CAMPO

5.1. Veículo Aéreo Não Tripulado

Como referido anteriormente, para aquisição de informação térmica da frente de fogo, foi utilizado um VANT de perfil tático, DJI Mavic 2 Enterprise Dual (**Figura 5.1**). Este VANT com 899g (sem acessórios) pode operar numa gama de temperaturas entre os -10°C e os 40°C e até uma altitude de 6000mASL .



Figura 5.1: VANT DJI Mavic 2 Enterprise Dual com câmara térmica M2ED, fabricada pela FLIR (retirado de [33])

A sua carga sensorial consiste numa câmara M2ED (FLIR), a qual tem uma lente com abertura $HFOV: 57^{\circ}$, e um sensor de $640 \times 480\text{px}$. A aquisição térmica está otimizada para comprimentos de onda compreendidos entre $8\mu\text{m}$ e $14\mu\text{m}$ (LWIR). Esta câmara é suportada por um *gimbal*, o qual permite estabilização nos três eixos de rotação. O VANT inclui ainda uma câmara no espectro visível.

5.2. Grupo de Controlo

O grupo de controlo é formado por uma câmara de infravermelhos SC660, fabricada pela FLIR, a qual é capaz de medir dentro da gama de temperaturas $[-10^{\circ}\text{C}; 1500^{\circ}\text{C}]$, correspondente a uma gama espectral $[1.64\mu\text{m}; 11\mu\text{m}]$, com uma precisão de $\pm 1^{\circ}\text{C}$. Esta câmara foi posicionada numa encosta situada no lado oposto à das parcelas, encontrando-se a sensivelmente 490m da parcela Gest2019_02 (mais próxima) e 575m da parcela Gest0219_07 (mais distante), sendo que a aquisição de imagem foi realizada de forma estática para todos os ensaios. A sua localização relativamente às parcelas encontra-se representada na **Figura 5.2**.

Os dados obtidos a partir do grupo de controlo não são necessariamente mais precisos que os dados da imagem aérea. O seu objetivo é somente fornecer informação térmica cujos parâmetros de captação, ao contrário da imagem aérea, não variem durante o ensaio.



Figura 5.2: Localização do grupo de controlo em relação às parcelas (a) e câmara FLIR (b) (retirada de [34])

6. REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE CAMPO

Os planos de voo previamente elaborados para o VANT tático contêm parâmetros de captação de imagem muito específicos, como por exemplo coordenadas e ângulos de câmara, informações que deveriam ser implementadas num sistema de planeamento de voo de forma a que o VANT realizasse o voo de forma, idealmente, autónoma. Assim, no dia dos ensaios e, com auxílio do operador, optou-se por realizar voos que pudessem ser parametrizados de acordo com a informação que o monitor de controlo do VANT devolvia no momento do voo.



Figura 6.1: Queima da parcela Gest2019_02 (fotografia tirada com o VANT da ADAI)

O primeiro ensaio, decorrido na parcela Gest2019_01, teve início às **10h36**. A imagem deste ensaio foi recolhida de forma oblíqua à direção de propagação da frente de fogo, tendo sido realizados patamares de 5m em altitude real a cada três minutos de ensaio, com um ângulo do sensor estimado de 45°. O segundo ensaio, decorrido na parcela

Gest2019_02, teve início às **11h30**. Este foi realizado com a câmara a *nadir*, tendo sido realizados os mesmos patamares de 5m em altitude em intervalos de dois a três minutos. **No caso do ensaio Gest2019_02, a *working distance* é coincidente com a altitude AGL real, pelo que estes termos são doravante conotados com o mesmo significado.** Em ambos os ensaios, o VANT posicionou-se inicialmente a 10mAGL.



(a)

(b)

Figura 6.2: Queima da parcela Gest2019_01 onde é visível a ação direcional que o vento exerce no fogo (a) e o recurso a pinga-lumes para gerar focos de ignição, os quais contrariam este efeito (b) (fotografias tiradas com o VANT da ADAI)

Era desejável continuar a aquisição de imagem nos ensaios subsequentes ao ensaio Gest2019_02. No entanto, no início do terceiro ensaio verificou-se uma velocidade do vento de 23km/h, informação adquirida através da estação meteorológica instalada no local. Perante este fato o operador do VANT aludiu à falta de condições de segurança para a realização do voo, sendo a segurança dos intervenientes a principal prioridade. A crescente velocidade do vento impediu a aquisição de imagem dos restantes ensaios. A descrição dos voos realizados encontra-se detalhada na **Tabela 6.1** e **Tabela 6.2**.

Durante os dois voos de aquisição de imagem registou-se uma temperatura ambiente entre 20.2°C e 21.9°C e um teor de humidade relativa reduzido, variando entre 34% e 49%. A presença de um baixo teor de vapor de água no ar significa que o seu efeito sobre a absorção de radiação térmica poderá não ser muito acentuado.

A **Figura 6.1** apresenta um momento durante a queima da parcela Gest2019_02 e a **Figura 6.2** apresenta o efeito direcional do vento sobre o fogo e a introdução de focos de ignição pela equipa do CEIF com recurso a pinga-lumes, de forma a contrariar esse efeito.

Tabela 6.1: Detalhes do voo realizado pelo VANT tático no ensaio Gest2019_01

Hora	Tempo útil decorrido de ensaio	Ângulo da câmara [°]	Altitude [mAGL]
10h36m28s	00m00s	~45	10
10h40m22s	03m54s	~45	15
10h42m22s	05m54s	~45	20
10h44m28s	08m00s	~45	25
10h46m28s	10m00s	~45	30
10h48m28s	12m00s	~45	35
10h50m28s	14m00s	~45	40
10h51m56s	15m28s	~45	-

Tabela 6.2: Detalhes do voo realizado pelo VANT tático no ensaio Gest2019_02

Hora	Tempo útil decorrido de ensaio	Ângulo da câmara [°]	Altitude [mAGL]
11h34m00s	00m00s	0	10
11h36m30s	02m30s	0	15
11h39m00s	05m00s	0	20
11h41m30s	07m30s	0	25
11h43m36s	09m36s	0	30
11h45m40s	11m40s	0	35
11h47m30s	13m30s	0	40
11h50m11s	16m11s	0	-

7. TRATAMENTO DA IMAGEM E ANÁLISE DE RESULTADOS

Para possibilitar a análise da imagem recolhida nos ensaios é necessário realizar vários processos de tratamento, os quais são acompanhados de uma análise de resultados. Nos subcapítulos seguintes são descritos os passos tomados para a obtenção de resultados para a parcela Gest2019_02 e Gest2019_01, ainda que a análise deste último ensaio tenha sido comprometida pela qualidade da imagem de controlo.

7.1. Análise Preliminar à Imagem dos Ensaios

7.1.1. Imagem Aérea

Relativamente à imagem obtida através da plataforma aérea, não foi fornecida a gama de temperaturas captada no fogo. Apesar de ser captada uma grande extensão da área ativa do incêndio, não existe variação de cor (temperatura) que permita a distinção da frente e das chamas. O fumo não causou obstrução à aquisição da imagem térmica, dificultando, no entanto, a localização dos vértices da parcela, necessários à ortogonalização da imagem.

De uma forma geral, o VANT demonstrou estabilidade durante os ensaios, não existindo vibração que pudesse resultar em falta de definição da imagem. As imagens da **Figura 7.1** e **Figura 7.2** são *frames* exemplificativos da imagem aérea visível e térmica adquirida durante os ensaios, carecendo de qualquer tipo de tratamento.

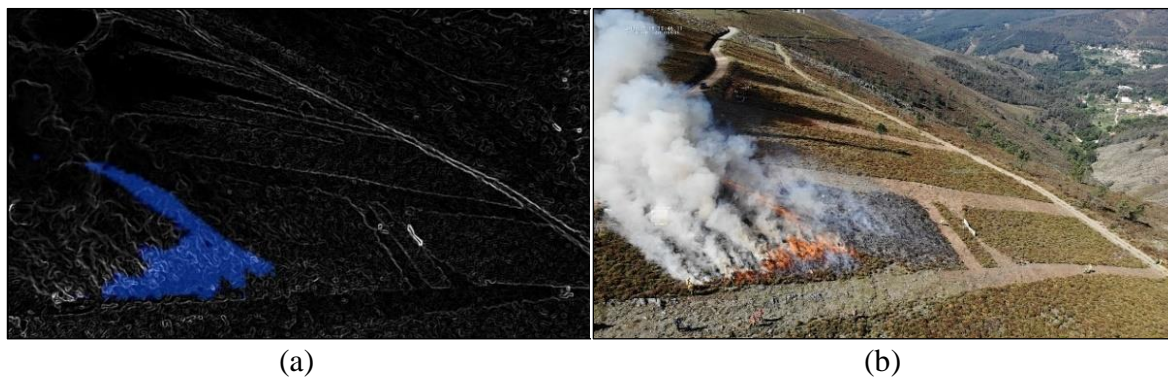


Figura 7.1: Exemplo de imagem infravermelha (a) e visível (b) captadas no mesmo instante pelos sensores a bordo do VANT durante o ensaio Gest2019_01

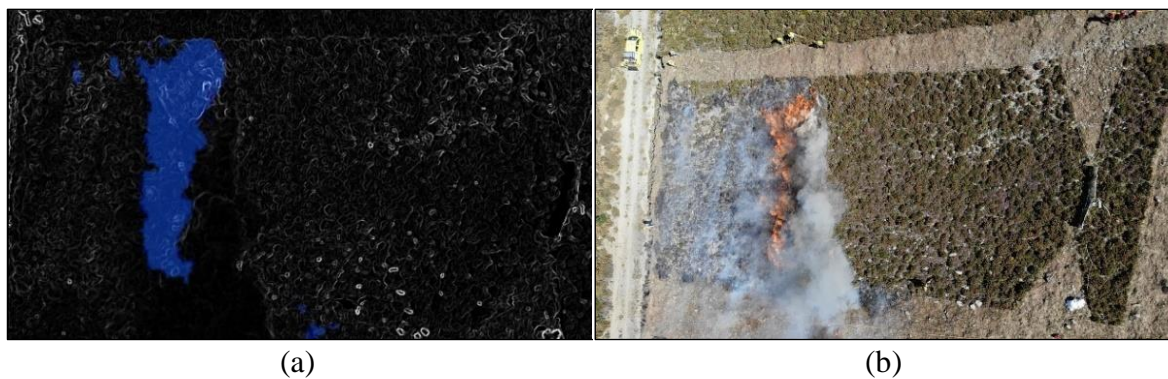


Figura 7.2: Exemplo de imagem infravermelha (a) e visível (b) captadas no mesmo instante pelos sensores a bordo do VANT durante o ensaio Gest2019_02

7.1.2. Imagem de Controlo

Relativamente à imagem térmica obtida a partir do grupo de controlo, verificou-se ser impossível retirar referências da parcela do ensaio Gest2019_01, inibindo assim a referenciação da frente a um ponto de referência. Aliado a este facto, também não se conhece com rigor o ângulo da câmara durante a aquisição aérea. Além disso, relativamente à imagem aérea, durante a descrição de alguns patamares de altitude não se captou a totalidade da frente de fogo. Tendo isto em conta, apenas foi possível retirar conclusões acerca do ensaio Gest2019_02, no qual foi possível visualizar a frente de fogo e as referências geográficas em todos os momentos, as quais habilitam a referenciação da frente de fogo. O processo de extração de *frames* de controlo não foi realizado para o ensaio da parcela Gest2019_01.

Através da manipulação da gama de temperaturas na imagem de controlo relativa ao ensaio Gest2019_02 através do programa ThermaCAM (FLIR) foi ainda possível realizar a segmentação da frente de fogo em várias fases do seu desenvolvimento. Verificou-se que em estágio inicial, a sua temperatura encontra-se na gama [270°C – 550°C] e em estágio desenvolvido na gama [380°C – 590°C]. Estes dois momentos estão representados na **Figura 7.3**. Verificou-se ainda que em alguns momentos do ensaio a frente de fogo chegou à temperatura de saturação do sensor (833°C ou 1106K).

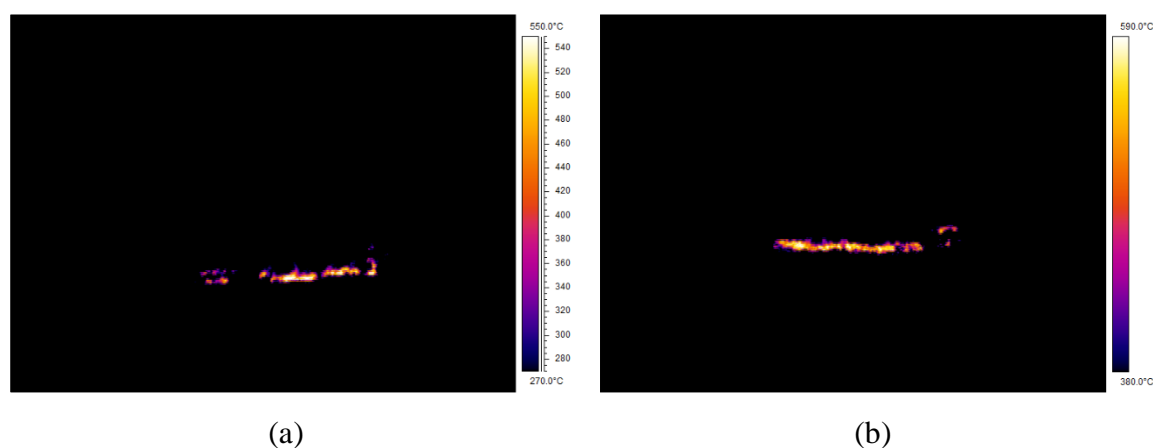


Figura 7.3: Segmentação da frente em estágio inicial (a) e em estágio avançado (b)

Através da lei de Wien, a qual deverá representar resultados fidedignos para as temperaturas típicas de um fogo (600K a 1200K), é possível conhecer qual o comprimento de onda para o qual a intensidade da radiação é máxima em função da gama de temperaturas obtida. Concluiu-se que a frente de fogo no incêndio realizado na parcela Gest2019_02 tem uma gama espectral entre $5.34\mu m$ e $2.62\mu m$, de acordo com o esperado.

$$\lambda_{max}[\mu m] = \frac{2897,6}{T[K]} \quad (7.1)$$

Dado que o sensor da plataforma aérea se encontra otimizado para a gama espectral [$8\mu m$; $14\mu m$], conclui-se que o sensor não é o mais indicado para captação da frente de fogo. Conclui-se assim que a falta de distinção entre a frente de fogo e as chamas na

imagem aérea se deve à escolha inapropriada do sensor. Através do grupo de controlo verificamos que um sensor otimizado para comprimentos de onda próximos de $4\mu m$, é capaz de detetar as temperaturas características de um fogo florestal. Além disso, como referido no capítulo 4.8.1, este comprimento de onda apresenta boa transmissibilidade na atmosfera. Particularmente o comprimento de onda $3.9\mu m$ permite uma distinção mais clara da frente de fogo em relação à envolvente, particularmente importante no caso de se usar software para processos de segmentação automática da frente e tratamento da imagem térmica.

7.2. Criação de Filmes Compósitos

Este passo é exclusivo da imagem recolhida pela plataforma aérea. Ao analisar visualmente a imagem infravermelha, é possível verificar que não existe diferenciação de cor (temperatura) que permita a distinção entre a frente de fogo e as chamas que a sobrepõem. Tendo em conta a reduzida escala do ensaio, é desejável mitigar este efeito, de forma a permitir obter dados mais precisos sobre a localização da frente em relação às chamas, o que possibilita também o cálculo mais preciso de velocidades de propagação. Para o efeito desenvolveu-se um método de tratamento da imagem térmica com recurso ao software *Adobe Premiere*. Ainda que não tenha sido analisada, foi também gerado um vídeo compósito para a parcela Gest2019_01. Apresentam-se os passos da metodologia desenvolvida:

- Com recurso ao software *Adobe Premiere*, foram compilados os vários segmentos de 04min;50s da imagem visível de cada ensaio de forma a obter um único vídeo integral do ensaio.
- Procedeu-se da mesma forma para os vídeos de imagem térmica.
- Seguidamente, triplicou-se a faixa integral do vídeo de imagem térmica, saturando-se a mancha identificada pelo sensor da câmara em cada uma das cores da paleta RGB.
- Sobrepuseram-se os três vídeos de imagem térmica saturados em RGB, atribuindo opacidades a cada faixa tal que a sobreposição das manchas (de cor azul nas imagens da **Figura 7.1** e **Figura 7.2**) resulte na cor branca.

-
- A eliminação do efeito de sobreposição das chamas à frente de fogo atinge-se através do desfasamento no tempo destas três faixas, considerando que as chamas têm uma ação pendular, partindo da frente de fogo e voltando à sua origem após um determinado período de tempo. Partindo-se de um desfasamento entre faixas de meio segundo, otimizou-se este intervalo até que o efeito das chamas fosse minimizado, de forma a que a frente se apresentasse como uma linha branca de forma razoavelmente constante, entre instantes consecutivos.
 - Seguidamente sobrepôs-se o vídeo visível, com transparência adequada, de forma a que existam referências físicas da parcela, nomeadamente os vértices, necessárias à referenciação da frente aquando do tratamento da imagem no MicroStation95. A resolução do vídeo visível é diferente do infravermelho, no entanto, devido à aplicação do filtro MSX no vídeo de imagem térmica, foi possível realizar de forma fidedigna esta sobreposição. Utilizaram-se como referências os limites da parcela, alguns objetos como carros ou vegetação característica e pessoas.
 - Finalmente adicionou-se a *metadata* nos vídeos, a qual inclui a altitude AGL e o instante de aquisição do *frame*, rearranjando-se o seu posicionamento para que esta não cause obstrução à imagem. Incluiu-se também uma moldura de cor vermelha no vídeo final, necessária para o tratamento dos *frames* no MicroStation95.

7.3. Extração e Análise dos Fotogramas

De forma a identificar a frente de fogo e calcular os parâmetros característicos do fogo, nomeadamente a velocidade instantânea de propagação, a intensidade de propagação e a velocidade média de propagação, é necessário extrair *frames* dos vídeos que estejam espaçados de um determinado intervalo de tempo Δt . Para o processo de extração de *frames* da imagem aérea recorreu-se ao software VLC enquanto que para a de controlo recorreu-se ao software ThermaCAM.

7.3.1. Imagem Aérea

No caso da imagem aérea, o vídeo do ensaio Gest2019_02 tem uma duração aproximada de 925s, tendo sido exportado no *Adobe Premiere* a 30*fps*. Extraiu-se um *frame* a cada 1310 *frames*, resultando numa média de três *frames* por altitude. A cadência de extração foi otimizada de forma a que não fossem extraídos *frames* em altitudes intermédias.

Os *frames* correspondentes à altitude 10*mAGL* não foram utilizados dado que durante esse período a frente não se encontrava desenvolvida. Os *frames* relativos à altitude 40*mAGL* foram igualmente descartados, já que dizem respeito a uma fase de extinção do incêndio, não existindo propagação da frente de fogo. Foram usados na análise do ensaio Gest2019_02 um total de quinze *frames*, divididos pelas altitudes 15*mAGL*, 20*mAGL*, 25*mAGL*, 30*mAGL* e 35*mAGL*. Neste ensaio foi possível visualizar ou, no mínimo, extrapolar todos os vértices da parcela em todos os momentos do ensaio.

Os *frames* resultantes do processo de extração não se encontram espaçados com igual exatidão devido à diferente compressão (*fps*) usada na gravação original e no *Adobe Premiere*. Contudo, este pequeno erro não causa qualquer problema à análise posterior pois foi sempre usado nos cálculos o instante exato do *frame*, dado visível na *metadata* impressa no vídeo. No entanto, de forma geral o intervalo de tempo é de aproximadamente 44s entre *frames* consecutivos.

Na **Figura 7.4** encontram-se dispostos alguns *frames* extraídos do filme compósito, correspondentes aos quatro primeiros fotogramas da aquisição à altitude de 15*mAGL*, decorrentes do ensaio da parcela Gest2019_02. A integridade dos *frames* extraídos do filme compósito encontra-se no anexo B. Note que estes *frames* incluem já um tratamento adicional, o qual é descrito com detalhe no capítulo 7.4.

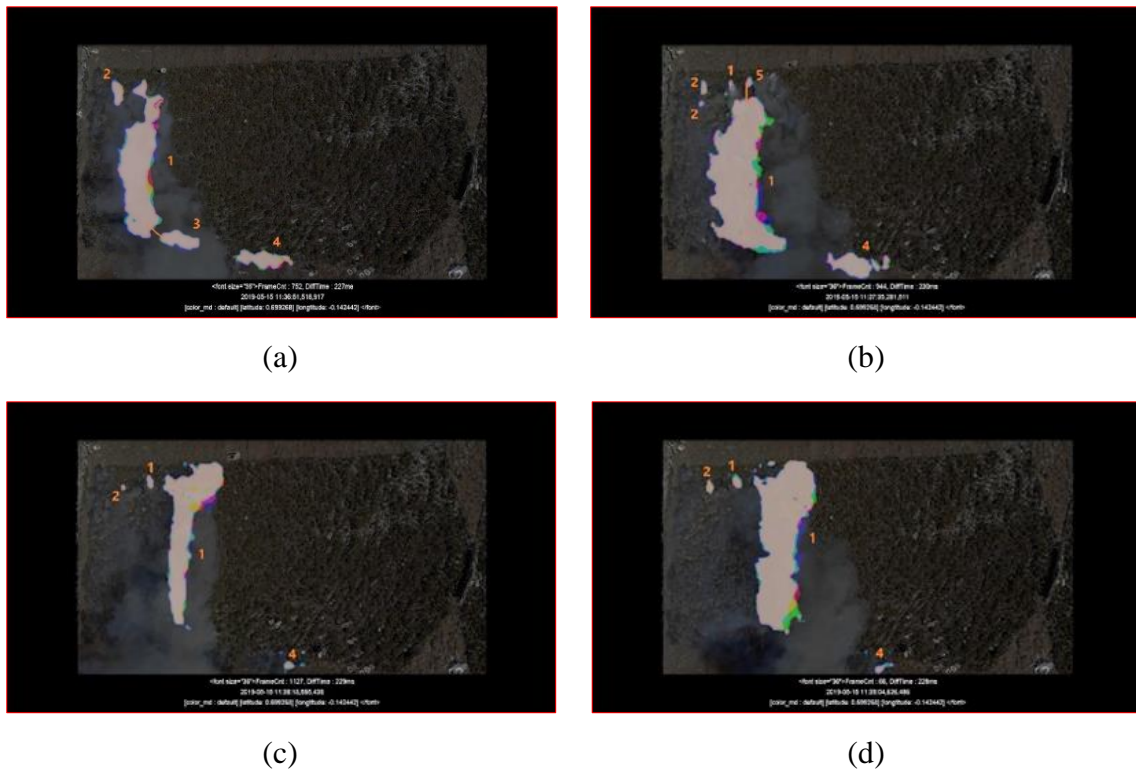


Figura 7.4: *Frames* extraídos do ensaio Gest2019_02, representativos da evolução do incêndio nos quatro momentos consecutivos em: (a) – 11h36m51,518,917s; (b) – 11h37m35,281,511s; (c) – 11h38m18,585,438s e (d) – 11h39m04,626,486s; adquiridos à altitude de 15mAGL, evidenciando-se a evolução dos focos de ignição postos pela equipa do CEIF. O número um (1) refere-se à frente principal, enquanto que os focos de ignição estão numerados de acordo com o momento da sua génese.

Na **Figura 7.5** apresentam-se *frames* extraídos do filme composto relativo ao primeiro ensaio (parcela Gest2019_01). Mesmo após otimização dos intervalos de extração de *frames* a intervalos constantes, verifica-se que o VANT demorou demasiado tempo nas manobras de mudança de altitude. Consequentemente descartaram-se cinco de um total de dezassete *frames*, nos quais o VANT, por se encontrar a uma altitude intermédia, não captou a totalidade da frente ou porque o seu movimento impossibilitou a análise do vídeo composto.

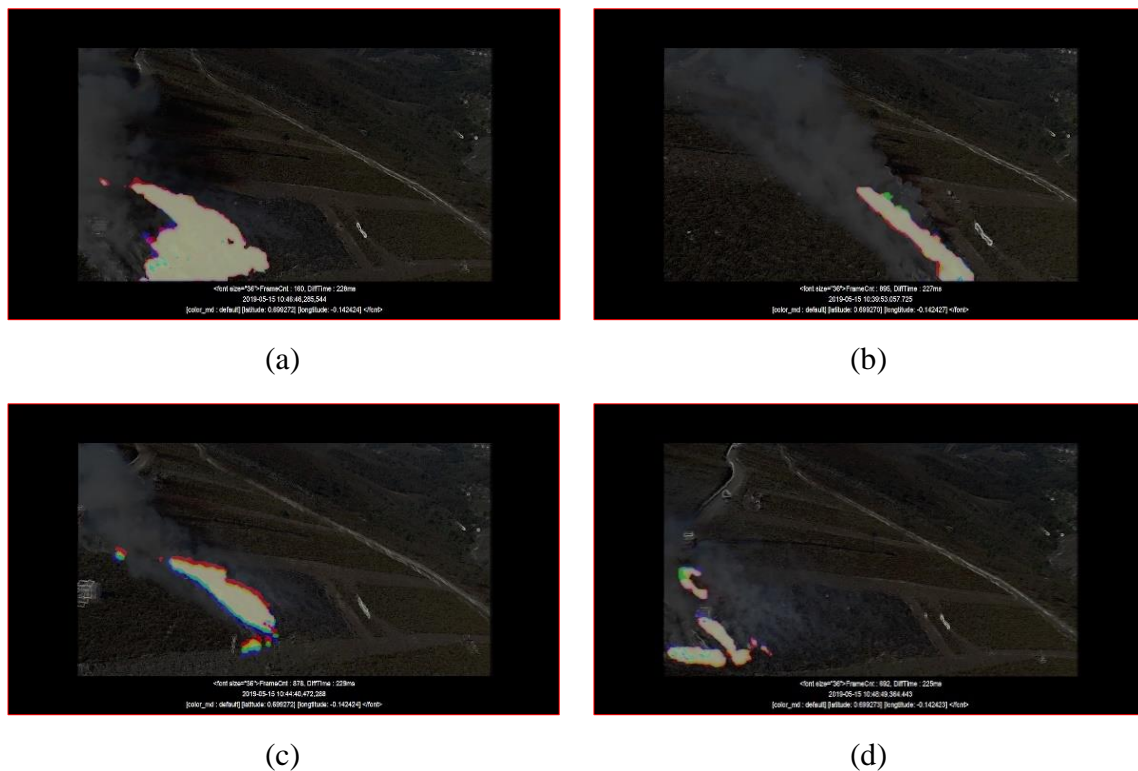


Figura 7.5: *Frames* extraídos do voo realizado no ensaio Gest2019_01, representativos da falta de rigor na aquisição de imagem durante o voo

7.3.2. Imagem de Controlo

Recorrendo ao programa ThermoCAM, foi possível realizar a extração manual dos *frames* da imagem de controlo do ensaio Gest2019_02. Estes devem situar-se nos mesmos instantes dos *frames* extraídos da imagem aérea, aproximando-se os instantes ao décimo de segundo, assumindo que os relógios de ambas as plataformas estão sincronizados.

De forma a que fosse possível distinguir detalhes da evolução da frente de fogo alterou-se a gama de temperaturas para [100°C, 550°C]. Extraíu-se ainda um *frame* extra onde é possível visualizar todos os vértices da parcela, necessários à referência da frente de fogo, alterando a gama de temperaturas para [10°C, 40°C]. Os *frames* da imagem de controlo correspondentes aos instantes das quatro imagens apresentadas na **Figura 7.4**, relativos à parcela Gest2019_02, encontram-se na **Figura 7.6**. A totalidade dos *frames* extraídos encontra-se no anexo C.

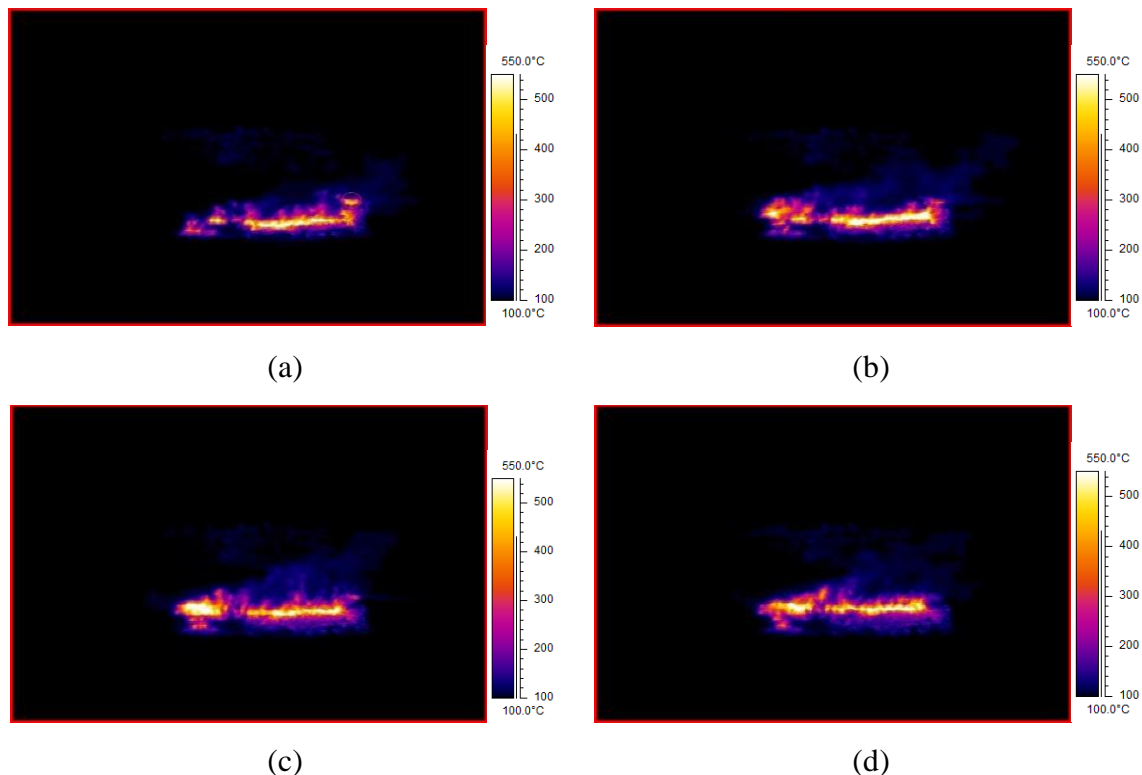


Figura 7.6: *Frames* extraídos da imagem obtida a partir do grupo de controlo, relativos aos mesmos quatro instantes representados na **Figura 7.4**

7.4. Focos de Ignição Durante o Ensaio

Devido à elevada intensidade do vento, durante o decorrer do ensaio a equipa do CEIF recorreu a pinga-lumes para introdução de focos na região dos flancos da frente, com particular incidência na ordenada da parcela $y = 4m$. Estes têm a finalidade de contrariar o efeito direcional que o vento exerce sobre o incêndio, guiando-o na direção desejada (*upslope*). Dado que estes focos existem e podem interagir com a frente principal (i.e., o foco mais desenvolvido), devem ser incluídos como fazendo parte da frente de fogo.

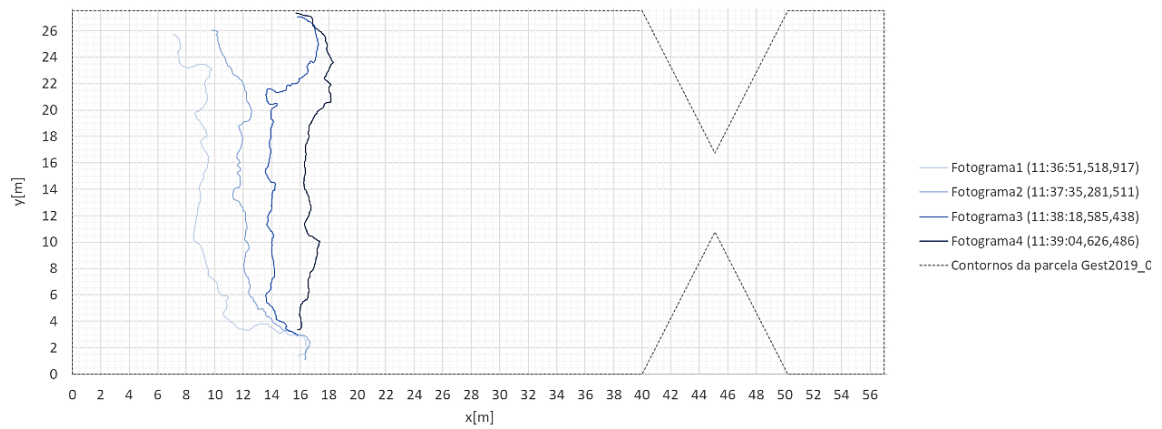
Este passo é necessário para que exista coerência entre as frentes identificadas no Microstaton95 para o mesmo instante na imagem aérea e de controlo, pelo que este estudo foi feito em simultâneo para ambas as imagens. Seguindo a lógica da propagação do incêndio, incluíram-se todos os focos que tendo uma dimensão não desprezável estejam relativamente próximos da frente principal e interajam com esta. A desfragmentação da

frente principal em vários focos menores é identificada como uma única frente, até que os focos fiquem atrás do segmento principal da frente ou apresentem um tamanho insignificante. O estudo da inclusão de focos foi feito considerando os instantes anteriores e posteriores a cada *frame* em análise, de forma a reconhecer a sua evolução. Nas figuras do anexo B estão identificados todos os focos individuais que nascem durante o ensaio, bem como o seu desenvolvimento e relação com a frente principal, os quais estão identificados com um número, de acordo com o momento da sua gênese. A frente principal é sempre identificada com o número um (1). O conjunto de imagens da **Figura 7.4** inclui esta análise.

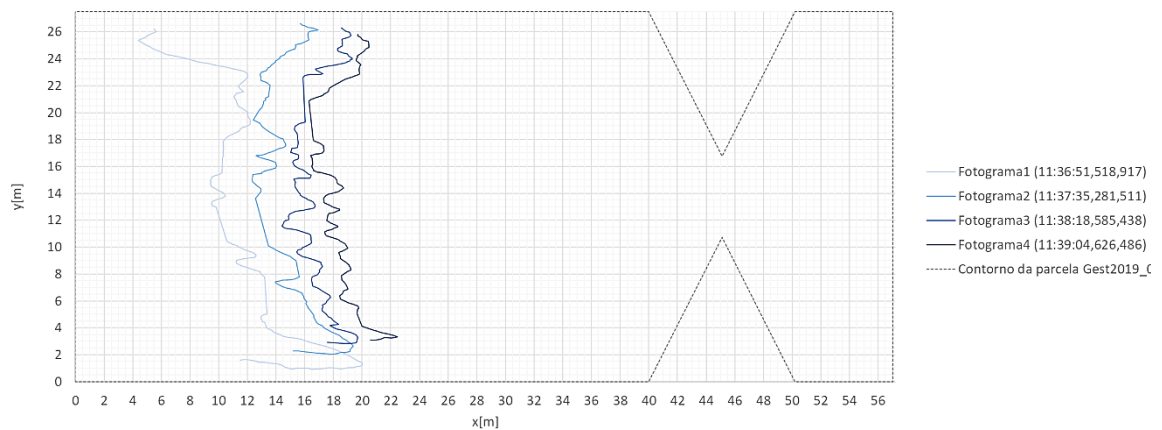
7.5. Identificação da frente de fogo

Após identificação dos focos de ignição e ponderação sobre a sua inclusão na frente de fogo principal, “identificou-se” a frente a partir da imagem aérea e de controlo, de forma separada, com recurso ao software MicroStation95 (metodologia desenvolvida no CEIF). (Nota: com “identificação” entende-se o registo ou desenho da linha representativa da frente de fogo nos filmes compósitos) Esta operação é realizada individualmente para cada altitude como se de ensaios individuais se tratassem, ou seja, individualizada para cada um dos conjuntos de instantes pertencentes a cada um dos patamares de altitude realizados pelo VANT tático: 15mAGL, 20mAGL, 25mAGL, 30mAGL e 35mAGL. O processo de identificação é feito manualmente através da introdução de pontos discretos sobre a “linha” identificada como frente de fogo nos vários *frames*. O número de pontos introduzidos manualmente varia entre *frames*, no entanto indica-se um valor entre 400 e 800 pontos por cada linha representativa da frente de fogo. O software realiza a ortogonalização da imagem automaticamente através de uma *macro*, devolvendo um ficheiro Excel com o conjunto de pontos introduzidos definidos por coordenadas cartesianas, referenciados a um dos vértices da parcela. Sobre cada um destes ficheiros foi possível gerar uma imagem representativa da evolução do incêndio, aglomerando todos os patamares de altitude realizados pelo VANT durante o ensaio.

Na **Figura 7.7** estão os resultados da identificação da frente de fogo para os instantes correspondentes à altitude de 15mAGL da imagem aérea e de controlo. A totalidade dos gráficos gerados podem ser consultados na sua integridade no anexo D e E.



(a)



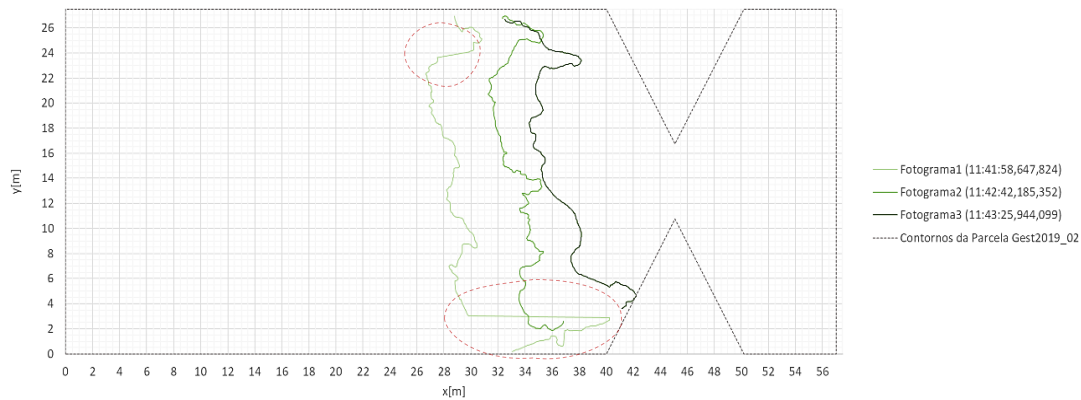
(b)

Figura 7.7: Gráficos resultantes do processo de identificação da frente com o software MicroStation95 para o mesmo conjunto de fotografias da imagem aérea (a) e de controlo (b)

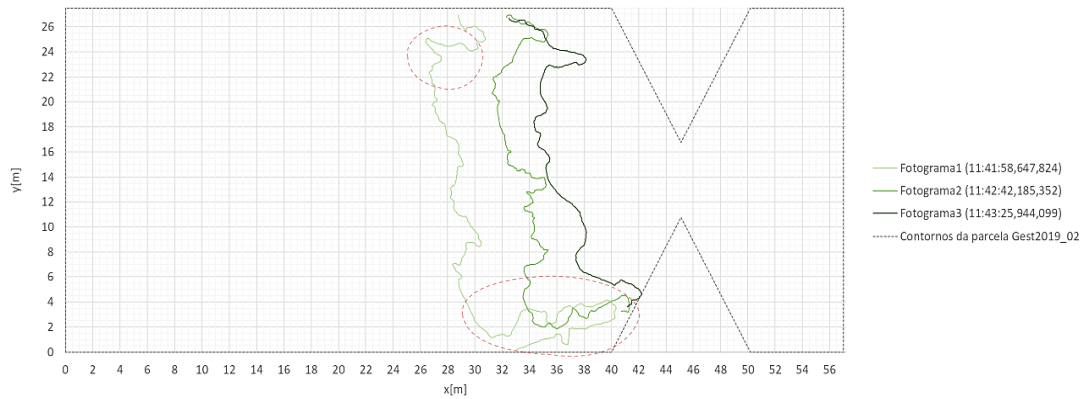
7.6. Problemas Verificados Durante a Identificação da Frente de Fogo

É importante referir que não deve existir mais de um ponto indicativo da frente em determinada ordenada da parcela no mesmo instante, de forma a não existir dúvida acerca de qual ponto da frente foi incluído na análise. Este cenário verifica-se na imagem aérea,

principalmente nos flancos da frente, sendo necessário fazer algumas alterações aos conjuntos de pontos pertencentes à altitude de $20mAGL$ e $25mAGL$. Tendo em conta a lógica da propagação do fogo, eliminaram-se os pontos que pudessem induzir resultados erróneos, tanto na geolocalização como no cálculo das velocidades de propagação. A **Figura 7.8** representa este processo para o ficheiro relativo aos instantes obtidos a $25mAGL$.



(a)



(b)

Figura 7.8: Linhas da frente de fogo identificadas para o conjunto de fotografias captadas a $25mAGL$ antes (a) e após (b) a eliminação de pontos

Este efeito foi tido em conta apenas para as cotas pares, sendo que os cálculos na folha de Excel são realizados de acordo com estas, minimizando a informação perdida no contorno original da frente. Refere-se ainda que este processo apenas tem influência negativa na representação da frente original.

Referente à imagem de controlo sobre a parcela Gest2019_02, a presença de obstáculos, como vegetação mais elevada e uma barreira colocada na zona de estreitamento da parcela, geram a presença de pequenos "buracos" na imagem de controlo. Este efeito traduz-se numa dificuldade acrescida à baixa resolução da imagem, sendo impossível durante essas instâncias (30mAGL e 35mAGL) saber exatamente onde se encontra a frente, estimando-se a sua posição. A **Figura 7.9** representa este cenário.

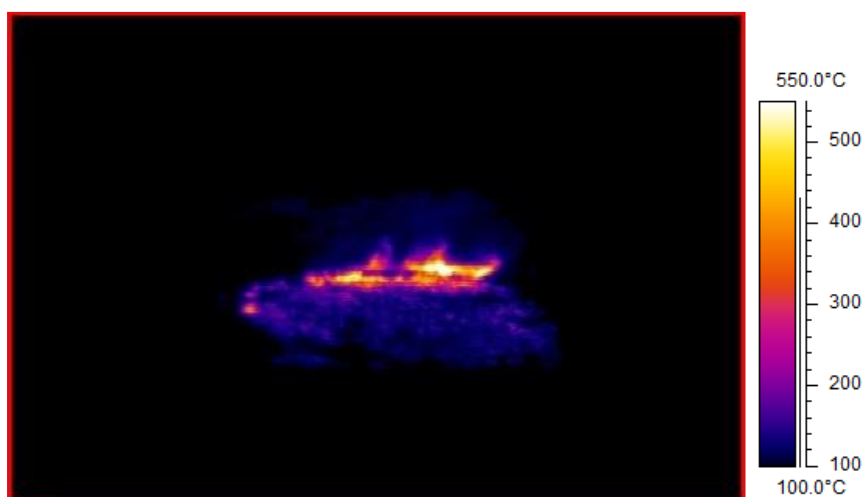
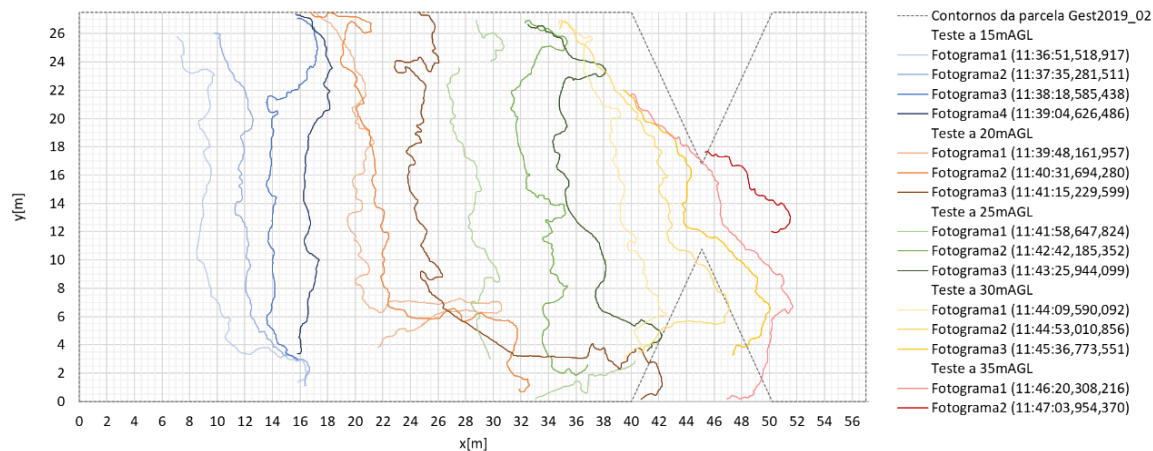
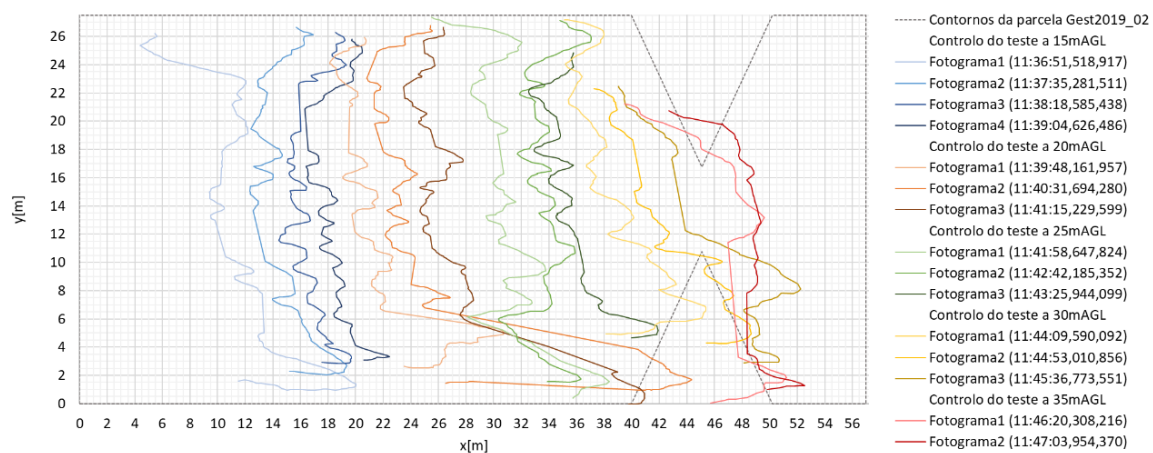


Figura 7.9: *Frame* extraído da imagem de controlo onde se observa a oclusão da frente de fogo pela barreira existente na zona de estreitamento da parcela Gest2019_02

A compilação de todas as frentes de fogo para cada plataforma de aquisição resultou em dois gráficos que representam a totalidade do ensaio (**Figura 7.10**), onde é possível observar a variabilidade da frente de fogo nos flancos, bem como momentos de desaceleração, verificados nas zonas com reduzido combustível (zona do estrangulamento da parcela, compreendida entre $x = 40m$ e $x = 50m$).



(a)



(b)

Figura 7.10: Gráfico representativo da evolução do incêndio formado a partir da identificação da frente de fogo através da imagem aérea (a) e de controlo (b)

7.7. Localização Geográfica da Frente de Fogo

Um dos objetivos da tese considera a possibilidade de se localizar geograficamente a frente de fogo. Esta foi feita com base nos pontos da frente que se situam nas ordenadas pares da parcela, de $y = 0m$ a $y = 28m$, totalizando quinze coordenadas por cada linha representativa da frente de fogo. Realizou-se uma folha de cálculo que procurasse

automaticamente e devolvesse a ordenada e a abcissa do ponto mais próximo da ordenada desejada, ou seja, de cada uma das ordenadas pares. Conhecendo as coordenadas do vértice da parcela ao qual os pontos foram referenciados, atribui-se a cada um dos pontos extraídos a partir deste processo uma coordenada geográfica. O processo de atribuição de coordenadas geográficas foi realizado para ambos os conjuntos de dados obtidos a partir do MicroStation95 da imagem de controlo e aérea, cumprindo os seguintes passos:

- Calculou-se o deslocamento L entre cada ponto da frente de fogo P (definido em coordenadas cartesianas x, y da parcela) e o vértice de referência da parcela A :

$$L = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (7.2)$$

- Verificou-se o ângulo descrito entre o limite inferior da parcela (normal ao sentido de propagação da frente de fogo), e o Norte geográfico, no sentido Este-Norte:

$$\alpha = 24.6^\circ \quad (7.3)$$

- Calculou-se o ângulo β entre L e o limite inferior da parcela, no sentido Este-Norte.

$$\beta = \text{acos}(y/L) \quad (7.4)$$

- O ângulo entre L e o Norte geográfico, θ , é calculado da seguinte forma:

$$\theta = \alpha + \beta \quad (7.5)$$

- Calcularam-se os parâmetros *departure* e *latitude* de cada ponto, traduzindo as distâncias a somar respetivamente ao *easting* e *northing* da coordenada do ponto de referência:

$$\text{Latitude} = L \times \cos(\theta) \quad (7.6)$$

$$\text{Departure} = L \times \text{sen}(\theta) \quad (7.7)$$

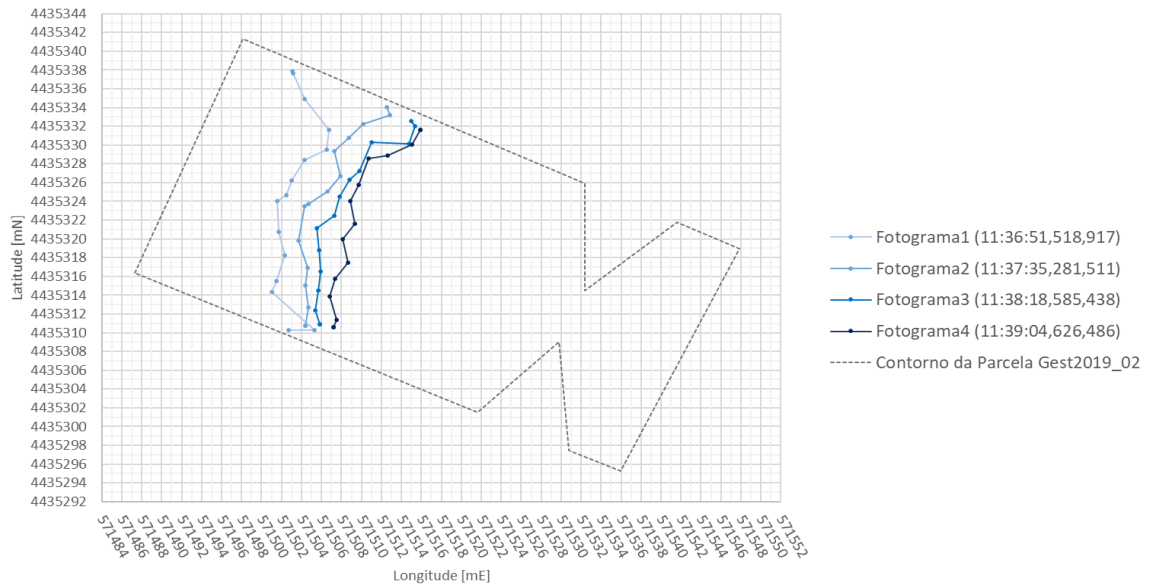
- Calcularam-se as coordenadas geográficas de cada ponto, tendo em conta o ponto de referência A que se encontra no limite inferior da parcela, o qual tem coordenadas conhecidas: 4435316.34mN, 571487.21mE.

A **Tabela 7.1**, representada abaixo, é um exemplo do processo de atribuição de coordenadas geográficas à frente de fogo, decorrente da análise do primeiro fotograma da imagem aérea: Fotograma1 (11:36:51,518,917), adquirido à altitude de 15mAGL.

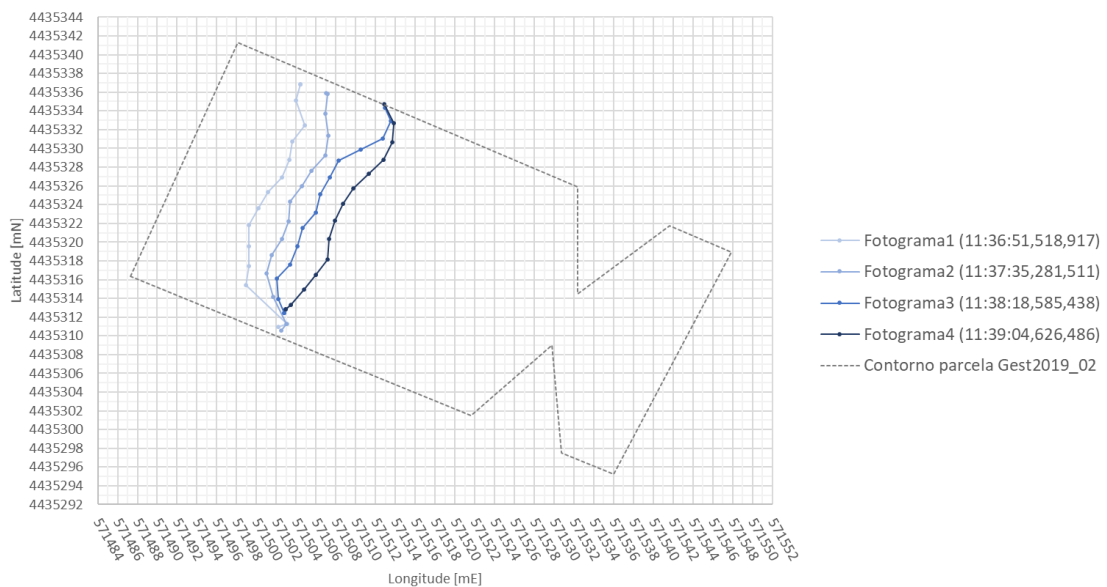
Tabela 7.1: Tabela representativa do processo de atribuição de coordenadas geográficas às linhas de frente de fogo

y[m] <i>(parcela)</i>	y[m] <i>(dados)</i>	x[m] <i>(dados)</i>	L[m] $= \sqrt{x^2 + y^2}$	θ[°] $= \alpha + \beta$	Latitude[mN] $= L \times \cos(\theta)$	Departure[mE] $= L \times \sin(\theta)$	Coordenada do ponto P	
							Northing [mN]	Easting [mE]
0	1.36	15.86	15.92	109.70	-5.37	14.99	4435310.97	571502.20
2	1.98	16.59	16.71	107.79	-5.10	15.91	4435311.24	571503.12
4	4.00	11.06	11.76	94.70	-0.96	11.72	4435315.38	571498.93
6	6.02	10.43	12.04	84.59	1.14	11.99	4435317.48	571499.20
8	7.95	9.55	12.43	74.81	3.26	12.00	4435319.60	571499.21
10	10.02	8.61	13.21	65.29	5.52	12.00	4435321.86	571499.21
12	12.04	8.75	14.89	60.60	7.31	12.97	4435323.65	571500.18
14	13.98	8.94	16.60	57.21	8.99	13.95	4435325.33	571501.16
16	16.01	9.54	18.64	55.40	10.59	15.34	4435326.93	571502.55
18	18.03	9.46	20.36	52.27	12.46	16.10	4435328.80	571503.31
20	19.96	8.93	21.87	48.71	14.43	16.43	4435330.77	571503.64
22	22.01	9.31	23.90	47.54	16.14	17.63	4435332.48	571504.84
24	24.03	7.47	25.17	41.87	18.74	16.80	4435335.08	571504.01
26	25.77	7.10	26.73	40.00	20.48	17.18	4435336.82	571504.39
28	25.77	7.10	26.73	40.00	20.48	17.18	4435336.82	571504.39

A partir das tabelas originadas através deste processo constituiu-se um gráfico que contém as coordenadas geográficas da frente e os contornos da parcela para cada altitude de teste. Apresentam-se ainda os gráficos resultantes do processo descrito anteriormente para a imagem aérea, **Figura 7.11**, e imagem de controlo, **Figura 7.11**, para o mesmo conjunto de instantes. Os gráficos resultantes do processo para os restantes conjuntos de instantes, obtidos às diferentes altitudes, podem ser consultados no anexo F e G.



(a)

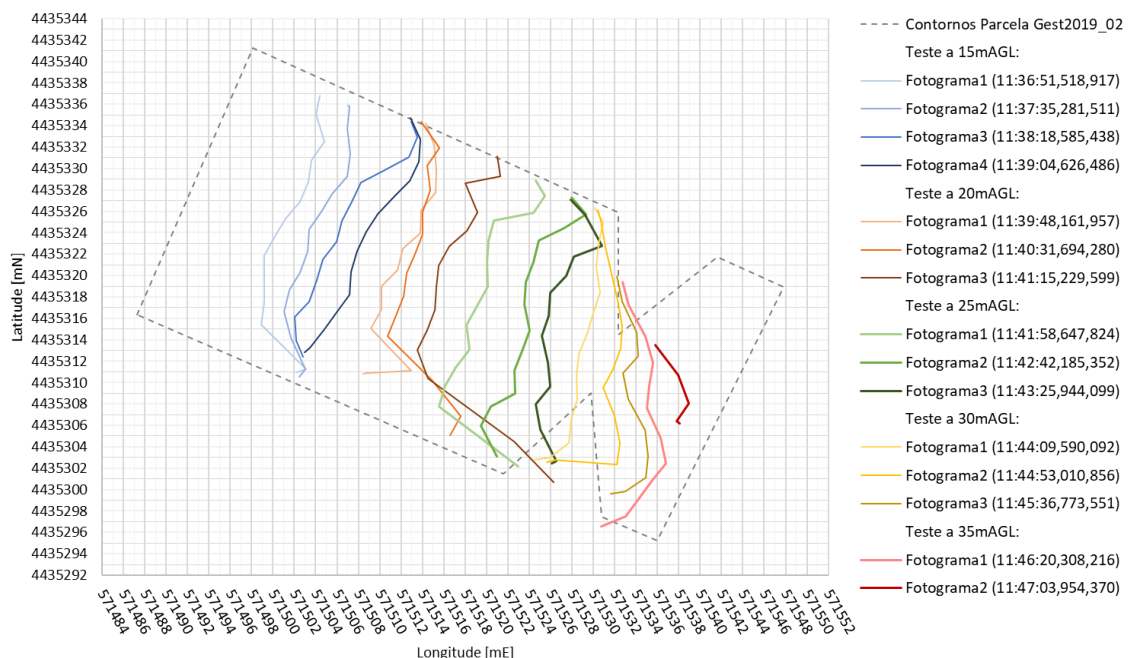


(b)

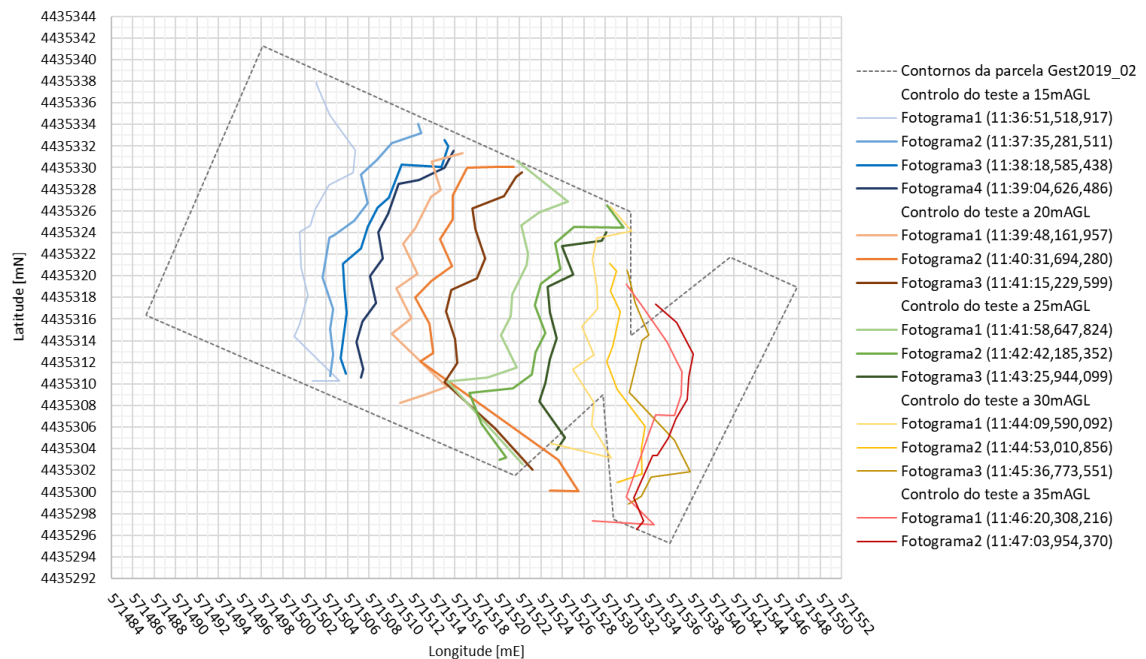
Figura 7.11: Gráficos resultantes do processo de atribuição de coordenadas geográficas à frente de fogo correspondente aos fotografamas obtidos à altitude de 15mAGL, a partir da imagem aérea (a) e de controlo (b)

Através do processo realizado até este ponto foi possível verificar a possibilidade de deteção e identificação da frente de fogo com recurso a imagem aérea térmica. Os dados produzidos foram suficientes para possibilitar a localização da frente através de um determinado número de coordenadas geográficas, sendo a qualidade desta identificação parcialmente limitada tanto pela quantidade de pontos introduzidos aquando do tratamento da imagem no MicroStation95 como pelos parâmetros de aquisição (i.e.: ângulo da câmara e *working distance*), os quais são objeto de estudo neste trabalho. Além disso, é necessário ter em conta que o processo de identificação da frente foi feito de forma manual, como também foi necessário a recorrer a técnicas alternativas para que fosse possível identificar a frente de fogo. Todas estas parâmetros podem induzir um determinado grau de imprecisão ou erro nos dados obtidos.

Apresentam-se seguida os gráficos representativos da totalidade do ensaio, obtidos a partir da imagem aérea, **Figura 7.12**, e de controlo, **Figura 7.12**, considerando todos os patamares de altitude realizados pelo VANT durante o ensaio:



(a)



(b)

Figura 7.12: Gráficos representativos da evolução da frente de fogo em coordenadas geográficas elaborados a partir da imagem aérea (a) e de controlo (b)

7.8. Cálculo da Velocidade Instantânea e Intensidade de Propagação

De forma a determinar a intensidade do fogo, é necessário calcular a velocidade instantânea entre frentes consecutivas, considerando as diferentes altitudes isoladamente. Isto significa que não se calcula a velocidade instantânea entre o instante final adquirido a uma altitude e o instante inicial da próxima altitude, uma vez que o objetivo final é compreender de que forma a aquisição a diferentes altitudes influi na precisão da localização geográfica e das velocidades estimadas. O método usado para calculo da velocidade instantânea e intensidade de propagação em cada patamar de altitude de teste foi o seguinte:

- Cálculo de Δt , representando a diferença temporal entre um momento de aquisição de um *frame* t_i e o anterior:

$$\Delta t = t_i - t_{i-1} \quad (7.8)$$

- Localização do dado que representa a abcissa da frente de fogo cuja ordenada mais se aproxima da desejada, recorrendo às funções *index* e *match* do Excel.
- Calculou-se Δd , distância percorrida pela frente de fogo entre dois instantes consecutivos. x_i representa a abcissa do ponto P no instante i :

$$\Delta d = x_i - x_{i-1} \quad (7.9)$$

- Calculou-se a velocidade instantânea da propagação da frente para cada altitude e ordenada, através dos valores de Δd e Δt :

$$R = \frac{\Delta d}{\Delta t} \quad (7.10)$$

- A partir dos valores de velocidade instantânea calculou-se a intensidade de propagação: [26].

$$I = H_c \cdot M'_c \cdot R \quad (7.11)$$

Na fórmula anterior H_c representa o poder calorífico inferior do combustível, considerando-se o valor de 20MJ/kg . M'_c representa a carga de combustível, mais precisamente, a massa de combustível consumida durante o incêndio. Considerando que apenas 70% do combustível presente no ensaio ardeu, para esta variável tomou-se o valor de 2.2 kg/m^2 . Os valores anteriores definem as características da vegetação do local dos ensaios (*mato baixo*). [35]

7.9. Cálculo da Velocidade Média de Propagação

O passo seguinte contempla os cálculos acerca da velocidade de propagação do incêndio para as imagens aérea e de controlo. À semelhança do cálculo da velocidade instantânea e da intensidade, a velocidade média foi calculada para as diferentes altitudes como se de ensaios individuais se tratassem e discretizada para as ordenadas pares da parcela $4m, 8m, 12m, 16m, 20m$ e $24m$. Estas ordenadas correspondem às utilizadas para o processo de geolocalização da frente de fogo (capítulo 7.7). Os resultados foram particularizados para as duas ordenadas $12m$ e $16m$, onde o fogo se propaga em condições mais estáveis, com menores efeitos resultantes da interação com focos de ignição. A metodologia de cálculo foi a seguinte:

- Cálculo de Δt^* representando a diferença temporal entre $t_{i,j}$ e $t_{1,j}$, sendo que $t_{i,j}$ representa o momento de aquisição de um *frame* contendo a frente de fogo, a uma determinada altitude j e $t_{1,j}$ o momento de aquisição do primeiro *frame* contendo a frente de fogo à altitude j

$$\Delta t^* = t_{i,j} - t_{1,j} \quad (7.12)$$

- Localização do dado que representa a abcissa da frente de fogo cuja ordenada mais se aproxima da desejada, recorrendo às funções *index* e *match* do Excel.
- Calculou-se Δd^* , representando a distância percorrida pela frente de fogo na ordenada y da parcela entre os instantes $t_{i,j}$ e $t_{1,j}$, considerando uma determinada altitude j :

$$\Delta d^* = x_{i,j} - x_{1,j} \quad (7.13)$$

- Calculou-se a velocidade média da propagação, \bar{R} , da frente para cada altitude e ordenada, através do cálculo do declive da reta da regressão linear realizada a partir dos pontos formados pelo conjunto de valores Δd e Δt , para cada altitude;
- Foi ainda calculada a média da velocidade de propagação ao longo de cada ordenada, considerando todas as altitudes, ou seja, o ensaio integral:

$$\bar{R}_t = \frac{\sum \bar{R}_j}{j} \quad (7.14)$$

A **Tabela 7.2** e **Tabela 7.3** contêm os resultados para os valores de velocidade média, velocidade instantânea e intensidade de propagação da frente para cada instante, a cada altitude e ordenada na parcela considerada, decorrentes da análise da imagem de controlo e aérea respetivamente. Nestas tabelas, $t[s]$ representa o tempo decorrido desde o início do ensaio, marcado às 11h30.

No anexo H e I apresentam-se as tabelas integrais com os resultados do cálculo dos parâmetros de velocidade e intensidade de propagação. É importante referir que a reduzida quantidade de *frames* recolhidos à altitude de 35mAGL não permite o cálculo da velocidade média a qualquer ordenada.

Tabela 7.2: Parâmetros característicos do fogo calculados a partir da **imagem de controlo**

Ordenada da parcela		4m		8m		12m		16m		20m		24m	
Alt. [mAGL]	t [s]	R m/s	I kW/m	R m/s	I kW/m	R m/s	I kW/m	R m/s	I kW/m	R m/s	I kW/m	R m/s	I kW/m
15m AGL	411.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	455.3	0.091	3.99	0.060	2.65	0.063	2.75	0.086	3.80	0.018	0.80	0.146	6.44
	498.6	0.009	0.40	0.015	0.66	0.024	1.07	0.016	0.68	0.037	1.62	0.058	2.56
	544.6	0.017	0.77	0.012	0.55	0.021	0.94	0.008	0.37	0.002	0.09	0.002	0.10
	\bar{R} [m/s]	0.0351		0.0331		0.0556		0.0277		0.0384		0.0595	
20m AGL	588.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	631.7	0.318	14.0	0.097	4.25	0.046	2.03	0.115	5.06	0.063	2.78	0.074	3-28
	675.2	-0.075	3.29	0.028	1.24	0.036	1.58	0.029	1.29	0.026	1.15	0.048	2.12
	\bar{R} [m/s]	-0.1494		0.0565		0.0717		0.0586		0.0523		0.0965	
	25m AGL	718.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
762.2		-0.011	0.47	0.060	2.65	0.082	3.61	0.054	2.36	0.077	3.38	0.080	3.53
805.9		0.085	3.74	0.031	1.36	0.017	0.73	0.017	0.77	0.015	0.65	0.033	1.47
\bar{R} [m/s]		0.1696		0.0616		0.0333		0.0349		0.0293		0.0667	
30m AGL		849.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	893.6	0.165	7.26	0.119	5.22	0.103	4.54	0.077	3.39	0.032	1.39	0.047	2.07
	936.8	0.029	1.28	0.057	2.52	0.020	0.87	0.026	1.13	0.030	1.30	0.020	0.87
	\bar{R} [m/s]	0.0580		0.1142		0.0393		0.0510		0.0590		0.0395	
	35m AGL	980.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1024.0		0.015	0.67	0.039	1.72	0.004	0.18	0.017	0.76	0.084	3.68	0.074	3.26
\bar{R} [m/s]		-		-		-		-		-		-	
\bar{R}_t [m/s]		0.0284		0.0664		0.0500		0.0430		0.0447		0.0655	

Tabela 7.3: Parâmetros característicos do fogo calculados a partir da **imagem aérea**

Ordenada da parcela		4m		8m		12m		16m		20m		24m	
Alt. [mAGL]	t [s]	R m/s	I kW/m	R m/s	I kW/m	R m/s	I kW/m	R m/s	I kW/m	R m/s	I kW/m	R m/s	I kW/m
15m AGL	411.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	455.3	0.068	2.99	0.057	2.52	0.077	3.41	0.050	2.22	0.083	3.66	0.074	3.24
	498.6	0.013	0.59	0.049	2.15	0.037	1.61	0.048	2.10	0.033	1.43	0.148	6.50
	544.6	0.031	1.37	0.060	2.65	0.062	2.74	0.054	2.39	0.073	3.22	0.021	0.94
	\bar{R} [m/s]	0.0227		0.0548		0.0500		0.0511		0.0537		0.0820	
20m AGL	588.2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	631.7	0.222	9.79	0.039	1.72	0.052	2.29	0.028	1.25	0.005	0.20	-0.022	0.97
	675.2	0.127	5.61	0.071	3.11	0.073	3.22	0.056	2.44	0.104	4.59	0.090	3.98
	\bar{R} [m/s]	0.1275		0.0708		0.0732		0.0555		0.1042		0.0905	
	25m AGL	718.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
762.2		0.099	4.33	0.138	6.08	0.133	5.87	0.088	3.87	0.108	4.73	0.073	3.22
805.9		0.179	7.87	0.050	2.22	0.061	2.66	0.058	2.56	0.076	3.35	0.090	3.94
\bar{R} [m/s]		0.1788		0.0505		0.0605		0.0582		0.0761		0.0896	
30m AGL		849.6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	893.0	0.013	0.57	0.116	5.13	0.063	2.78	0.079	3.48	0.041	1.79	0.018	0.77
	936.8	0.164	7.24	0.066	2.92	0.059	2.59	0.041	1.79	0.011	0.49	0.047	2.07
	\bar{R} [m/s]	0.1644		0.0663		0.0588		0.0408		0.0112		0.0470	
	35m AGL	980.3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1024.0		0.011	0.50	-0.009	0.39	0.070	3.09	0.059	2.61	0.088	3.87	0.121	5.32
\bar{R} [m/s]		-		-		-		-		-		-	
\bar{R}_t [m/s]		0.0488		0.0606		0.0606		0.0514		0.0613		0.0955	

7.10. Análise dos Valores: Velocidade Instantânea e Intensidade

Uma vez apresentada a metodologia de cálculo para a velocidade instantânea, intensidade da frente de fogo e velocidade média de propagação procede-se à análise dos seus valores. Nos parágrafos seguintes segue-se a análise de cada um destes parâmetros característicos do fogo, na ordem pela qual foram apresentados.

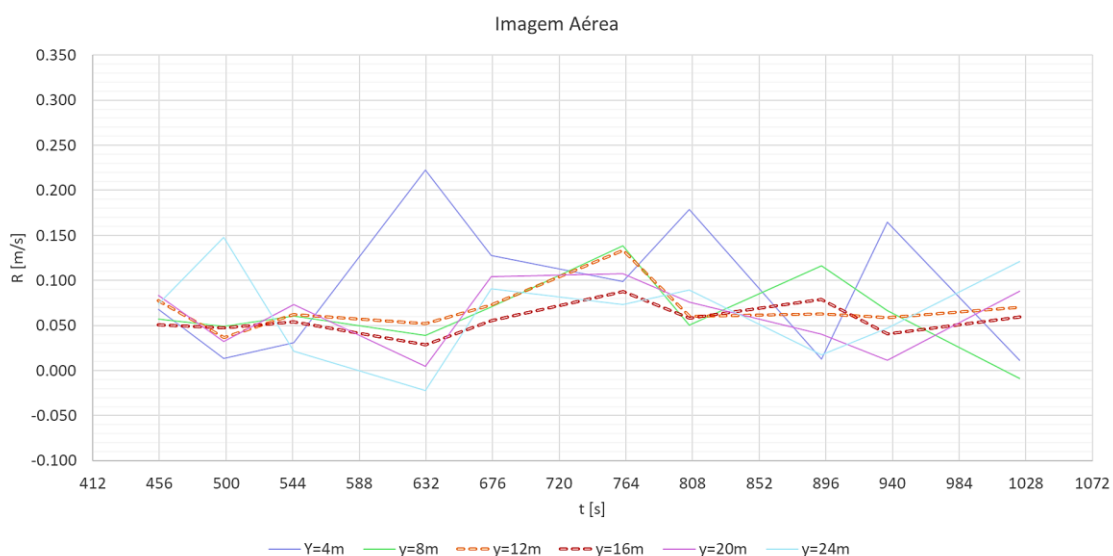
Como nota inicial, refere-se que nem sempre existe um ponto da frente nas ordenadas escolhidas, sendo que na folha de cálculo é procurado o valor mais próximo da ordenada, o que não significa que este lhe esteja próximo. Este cenário verifica-se nos flancos da frente onde existem frequentes momentos de redução da frente. Os valores que seguem marcadamente esta tendência estão assinalados a vermelho.

O sinal da velocidade instantânea oferece detalhe sobre o sentido da propagação, uma vez que o Δd e Δt são calculados entre duas frentes consecutivas. Os valores negativos de velocidade instantânea apresentam-se a sublinhado na **Tabela 7.2** e **Tabela 7.3**. Os quatro valores negativos registados na imagem aérea e de controlo devem-se, no entanto, a diferentes razões, as quais se passam a explicar:

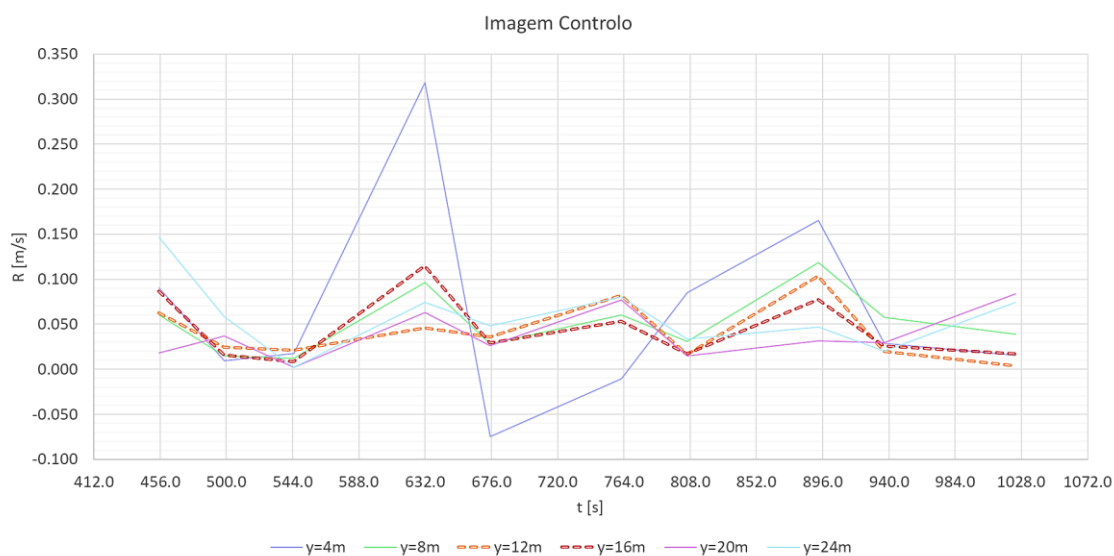
- O valor negativo registado na imagem aérea em $20mAGL$; $y = 24m$ deve-se à ineficiência do método desenvolvido (criação de filmes compósitos), sendo que não é possível eliminar completamente o efeito de avanço das chamas sobre a frente. Assim no instante anterior àquele em que se regista o valor negativo o contorno da frente representa na verdade as chamas.
- O segundo valor negativo registado na imagem aérea, em $35mAGL$; $y = 8m$, deve-se ao facto de nesse instante, o ponto mais próximo da ordenada $y = 8m$ ser $y = 12m$. Este valor não é válido para análise, correspondendo à situação já referida no início deste capítulo.
- Relativamente à imagem de controlo, ambos os valores negativos registados em $20mAGL$; $y = 4m$ e $25mAGL$; $y = 4m$, devem-se a momentos de aparente redução dos **flancos** da frente. Estes devem-se à interação dos focos de ignição com a frente principal, aproximando-se desta. Além deste facto, alguns destes focos atingem uma dimensão considerável, fragmentando-se e depois

extinguindo-se, apresentando-se uma aparente redução da frente. Apesar de apenas terem sido registados dois valores como consequência destes comportamentos, este cenário verifica-se ciclicamente durante o decorrer de todo o ensaio, particularmente junto da ordenada $y = 4m$ da parcela. Seria de esperar que estes valores negativos também se registassem nos mesmos instantes na imagem aérea. No entanto, devido ao grande detalhe com que foi possível visualizar a frente e os focos de ignição na imagem aérea, nestas duas instâncias específicas existem pontos nas ordenadas mais avançados que nos instantes anteriores. Neste último ponto revela-se a influência que a orientação do sensor pode ter no cálculo de parâmetros característicos do fogo, originando efeitos de perspectiva (*parallax*), induzindo possíveis erros de localização da frente de fogo aquando do processo de identificação.

Na zona média da parcela ($y = 12m$; $y = 16m$) as velocidades instantâneas variam entre $0.028m/s$ e $0.133m/s$ enquanto que, considerando as zonas dos flancos, a gama de velocidades é superior, entre $-0.022m/s$ e $0.179m/s$. Evidencia-se através destes valores que nas ordenadas médias da parcela o fogo se propaga de forma mais estável. Os gráficos da **Figura 7.13** representam a variação da velocidade instantânea em cada ordenada da parcela ao longo do tempo de ensaio, não se distinguindo as altitudes de teste.



(a)



(b)

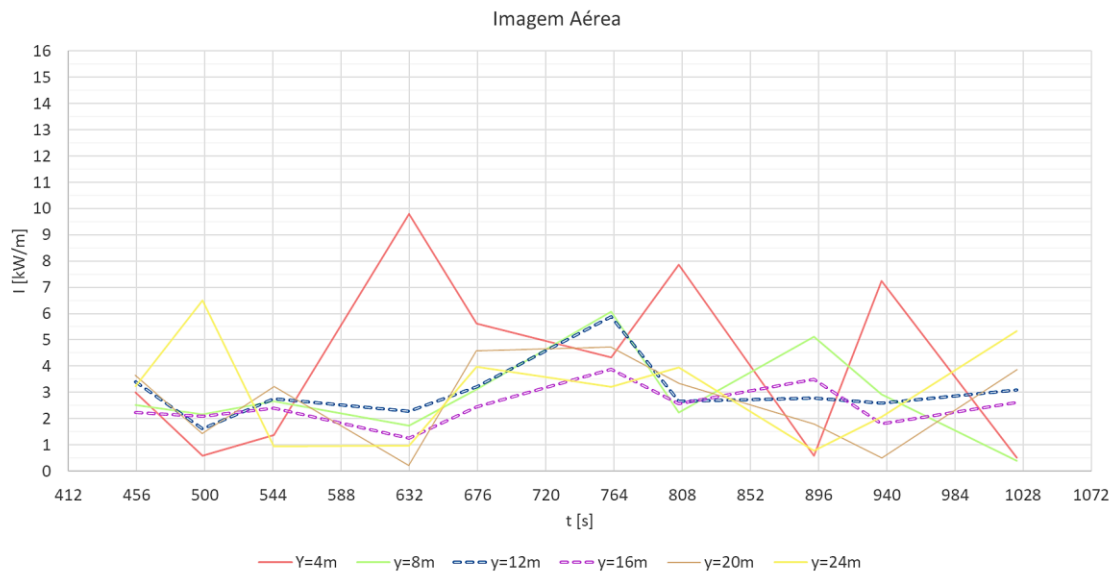
Figura 7.13: Gráficos representativos da evolução da velocidade instantânea de propagação nas diferentes ordenadas da parcela, obtidos a partir da imagem aérea (a) e imagem de controlo (b)

Verifica-se nos dois gráficos anteriores a elevada variabilidade nos valores de velocidade instantânea de propagação nos flancos da frente, especialmente em $y = 4m$. Representam-se a tracejado os valores de velocidade para as ordenadas médias da parcela, onde a variabilidade dos valores é, comparativamente ao flancos da frente, mais reduzida.

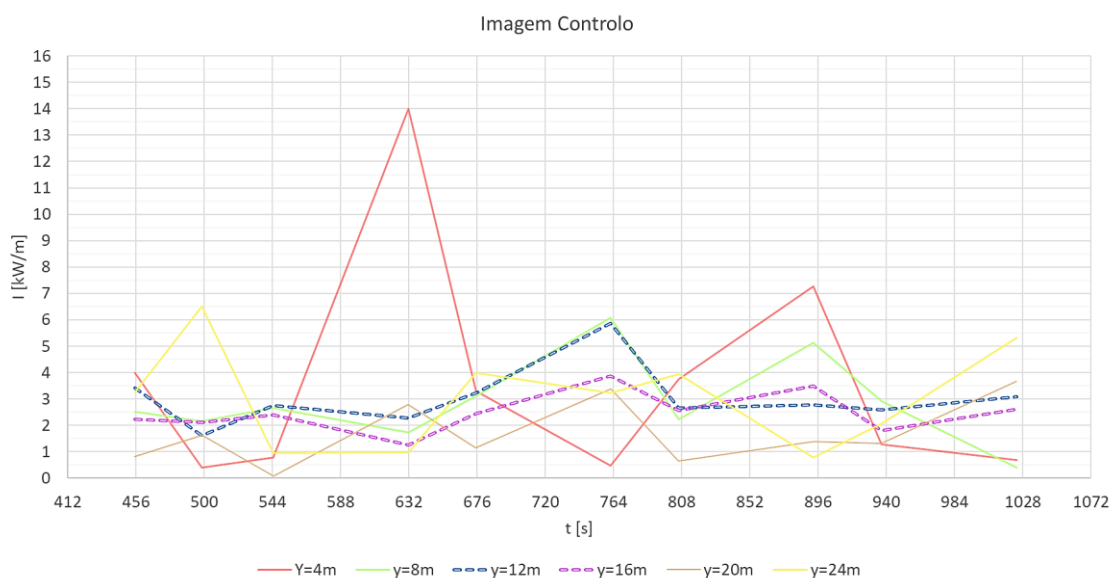
A intensidade de propagação (**Figura 7.14**) varia no mesmo padrão da velocidade instantânea, registando-se, à semelhança da velocidade instantânea, uma diferença significativa nos máximos: $9.79kW/m$ na imagem aérea e $14.00kW/m$ na imagem de controlo, correspondente a um aumento de 43%. É necessário ter em conta que se considerou o valor absoluto no cálculo da intensidade, não existindo valores negativos.

As variações bruscas de intensidade nos flancos devem-se mais uma vez ao facto de existirem grandes variações de velocidade instantânea nessas regiões devido à manipulação do fogo através dos focos de ignição. Ao analisar as linhas correspondentes à evolução da intensidade nas ordenadas médias é possível constatar uma evolução relativamente suave da intensidade, atingindo o máximo a meio do ensaio aos 764s, aproximadamente a meio do ensaio. Os máximos de intensidade nas linhas médias correspondem a $5.87kW/m$ para $y = 12m$ e $3.87kW/m$ para $y = 16m$ no caso da imagem

aérea e, $4.54kW/m$ para $y = 12m$ e $5.06kW/m$ para $y = 16m$ no caso da imagem de controlo. Como esperado, os valores máximos de intensidade são mais próximos considerando as ordenadas médias.



(a)



(b)

Figura 7.14: Gráficos representativos da evolução da intensidade de propagação nas diferentes ordenadas da parcela, obtidos a partir da imagem aérea (a) e imagem de controlo (b)

7.11. Análise dos Valores: Velocidade Média

Relativamente à velocidade média, compuseram-se quatro gráficos (Figura 7.15) para as diferentes altitudes de teste (15mAGL, 20mAGL, 25mAGL e 30mAGL), nos quais se evidenciam os valores obtidos para cada ordenada da parcela, de acordo com os dados extraídos da imagem aérea (marcador redondo) e de controlo (marcador triangular).

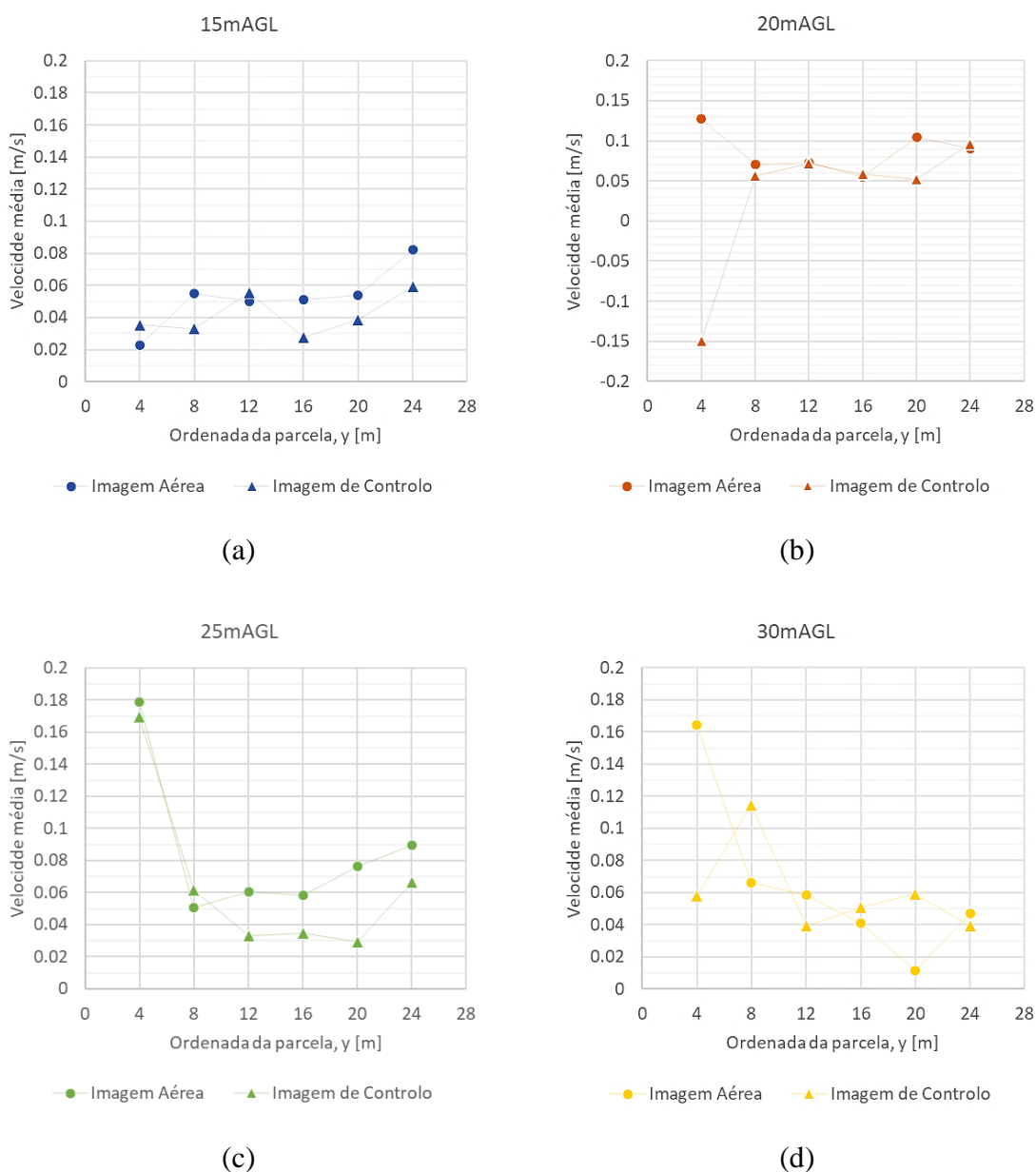


Figura 7.15: Gráficos comparativos dos valores de velocidade média calculados a partir da informação extrapolada da imagem aérea e de controlo, obtidos para as diferentes altitudes de teste: 15mAGL (a), 20mAGL (b), 25mAGL (c) e 30mAGL (d)

Como já referido, não foi possível traçar o gráfico para a altitude de $35mAGL$ pois não existem fotogramas suficientes que permitam o cálculo da velocidade média.

Comparando os valores obtidos para a imagem aérea e de controlo, é possível verificar graficamente que existem diferenças entre os valores de velocidade média para a mesma ordenada da parcela. No entanto os valores mais elevados verificam-se consistentemente para as zonas dos flancos da parcela. De facto, o valor de \bar{R} mais elevado regista-se para o mesmo conjunto de instantes e local da parcela da imagem aérea e de controlo ($y = 4m$; $25mAGL$), respetivamente $0.1788m/s$ e $0.1696m/s$. Os valores mínimos de \bar{R} são $0.0277m/s$ ($y = 16m$; $15mAGL$) e $0.0112m/s$ ($y = 20m$; $30mAGL$) para a imagem de controlo e aérea respetivamente.

É na zona média da parcela, correspondente às ordenadas $y = 12m$ e $y = 16m$, que o fogo se propaga com velocidade mais constante. No caso da imagem aérea, os valores de \bar{R} estão compreendidos entre aproximadamente $0.041m/s$ e $0.072m/s$, enquanto que na região dos flancos, $y = 4m$ e $y = 24m$, a variação é superior, entre $-0.022m/s$ e $0.179m/s$. Os valores decorrentes da imagem de controlo seguem a mesma tendência, registando-se nas ordenadas médias valores entre $0.0277m/s$ e $0.0556m/s$, enquanto que nos flancos a gama de variação é superior, entre $-0.1494m/s$ e $0.1696m/s$.

Conclui-se que os valores dos parâmetros calculados para as duas ordenadas médias fornecem uma melhor caracterização do fogo, uma vez que não existe manipulação direta da frente ao longo destas linhas, registando-se condições mais estáveis de propagação.

O valor negativo de velocidade média de propagação na imagem de controlo em $y = 4m$; $20mAGL$ deve-se ao facto de existir um valor negativo de velocidade instantânea durante essa altitude. O facto de a velocidade média ser calculada através de uma operação de regressão linear tem influência neste resultado.

No subcapítulo seguinte calcula-se o desvio (RMS) entre os valores de velocidade média decorrentes da imagem aérea e de controlo, evidenciando-se os resultados de desvio para as duas ordenadas médias da parcela. De acordo com esta análise, é esperado que o erro seja menor nessa região.

7.12. Análise dos Valores: Cálculo do Desvio

De forma a retirar conclusões acerca da altitude ótima para aquisição de imagem aérea infravermelha no ensaio realizado na parcela Gest2019_02, estimou-se o desvio entre os valores de velocidade média calculados a partir da imagem aérea e a de controlo. O erro associado à velocidade média é o mesmo que para a velocidade instantânea, a qual é função das mesmas variáveis Δd e Δt , e da localização geográfica da frente, função apenas de Δd .

Calculou-se o valor residual entre os dois valores (aérea e de controlo) em cada ordenada (representados nos gráficos da **Figura 7.5**), e seguidamente calculou-se o RMS (*root mean square*) associado a cada patamar de altitude individualmente. Para saber se esses valores são representativos da frente de fogo compararam-se os resultados obtidos para as ordenadas $y = 12m$ e $y = 16m$. Calculou-se ainda o RMS considerando todos os patamares de altitude. A **Tabela 7.4** apresenta os resultados do cálculo do desvio, os quais se podem verificar visualmente no **Figura 7.16**.

Tabela 7.4: Valores de desvio (de acordo com as ordenadas da parcela consideradas)

Altitude [mAGL]	Desvio [%] [$y = 4m$; $y = 28m$]	Desvio [%] [$y = 12m$; $y = 16m$]
15	1.97	2.40
20	12.62	0.34
25	2.90	3.59
30	5.74	2.20
[15;30]	4.40	1.35

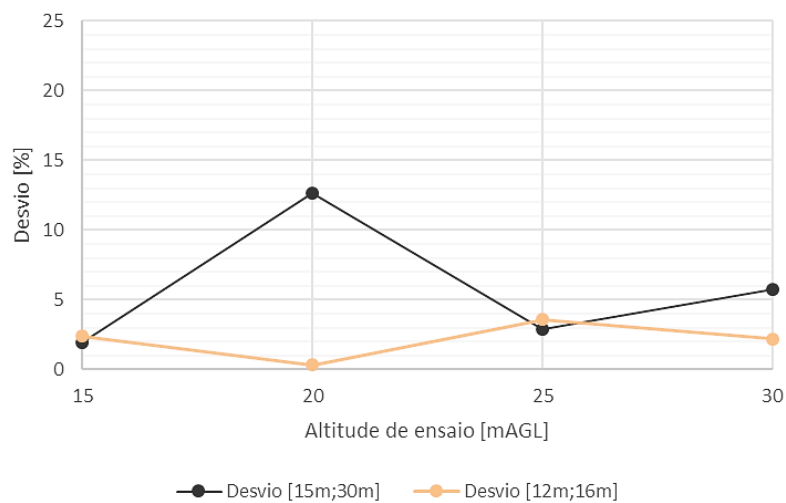


Figura 7.16: Valores de desvio de acordo com as ordenadas da parcela

Os valores de desvio obtidos para a totalidade da frente são significativos, registando-se valores entre 2% e 12,62%, sendo o mínimo verificado para o conjunto de instantes a 15mAGL e o máximo para 20mAGL. Comparando as duas linhas do gráfico, observa-se maior estabilidade nos desvios calculados para as ordenadas médias, bem como valores consideravelmente mais reduzidos, compreendidos entre 0,3% e 3,6%, sendo o mínimo verificado para 20mAGL e o máximo para 25mAGL. Com efeito, ao considerar a totalidade do ensaio e, considerando a aquisição de imagem durante todos os patamares de altitude descritos pelo VANT, o desvio verificado nas ordenadas médias é de 1,35%, enquanto que considerando a totalidade da frente, o desvio sobe para 4,4%.

Seria, no entanto, esperado observar um padrão no desvio para diferentes altitudes de teste, o que não se verifica. De facto, os valores de desvio entre quaisquer duas altitudes consecutivas são relativamente díspares verificando-se, no entanto, valores de desvio relativamente reduzidos. Estes dever-se-ão maioritariamente a erros sistemáticos, como por exemplo má calibração das câmaras (em relação à emissividade) e efeitos de perspectiva como acontece no grupo de controlo. Além disso, existem também erros aleatórios associados aos processos usados para tratamento da imagem como a identificação manual da frente e uso dos filmes compósitos. Particularmente o elevado valor de 12,62% pode ser resultado da influência marcada destes efeitos.

8. NOTAS CONCLUSIVAS

Na presente dissertação foi realizado um estudo acerca da aquisição de imagem infravermelha com recurso a VANTs em ensaios de campo com fogo controlado. Todos os passos tomados durante este trabalho serviram o principal objetivo de compreender a influência da distância da câmara à parcela (*working distance*) e ângulo do sensor na precisão dos dados extrapolados a partir da imagem térmica aérea, ainda que não tenha sido possível inferir acerca desta última variável (ângulo do sensor). Esta influência foi contabilizada através do cálculo do desvio entre dados extrapolados a partir da imagem térmica aérea e do grupo de controlo, o qual consistiu na aquisição de imagem de forma estática no solo.

Cada um dos parágrafos seguintes apresenta conclusões acerca de uma parte específica do trabalho realizado, sendo que algumas são particulares ao sensor a bordo do VANT utilizado nos ensaios.

Numa primeira fase foram elaboradas uma metodologia e uma folha de cálculo para a execução de planos de voo, as quais assentam num conjunto de regras e pressupostos que guiam a realização dos ensaios com aeronaves civis ou VANTs de perfil estratégico. Uma vez que não foram utilizadas as plataformas aéreas que haviam sido originalmente designadas para a realização dos ensaios, não foi possível concluir acerca da adequação dos pressupostos que guiaram o desenho dos ensaios, do padrão escolhido ou dos planos de voo estabelecidos.

A aquisição de imagem nos ensaios foi conduzida com um VANT *quadrotor* de perfil tático. Os planos de voo estabelecidos para esta plataforma não foram cumpridos. A imagem do ensaio Gest2019_02 foi obtida com o sensor a *nadir*, sendo descritos patamares de altitude de 5 em 5m a cada 2 minutos de ensaio. Relativamente à imagem do primeiro ensaio (Gest2019_01), tanto o posicionamento da aeronave em relação à frente como o ângulo da câmara não são consistentes ou concisos. Devido a este facto era desejável continuar a aquisição de imagem nos ensaios subsequentes ao ensaio Gest2019_02. Porém, a velocidade do vento registada no momento de início da queima do ensaio Gest2019_03 não permitiu a realização de voos com segurança. Concluiu-se que o vento constitui um dos

fatores mais determinantes e impeditivos da realização de aquisição de imagem com um VANT de perfil tático, pelo que os seus efeitos não devem ser descorados.

Relativamente à imagem aérea obtida no ensaio Gest2019_02 não foi possível distinguir a frente de fogo das chamas, sendo, no entanto, possível visualizar ou extrapolar as referências necessárias à referenciação geográfica da frente de fogo.

Após análise da imagem térmica recolhida através do grupo de controlo, verificou-se não ser possível a visualização de referências geográficas no ensaio Gest2019_01, nomeadamente os vértices da parcela, devido a escolha indevida da gama de temperaturas do sensor. Esta constituiu o principal impedimento à análise da imagem obtida neste ensaio. Foi então possível concluir acerca da importância da escolha adequada da gama de temperaturas durante a aquisição térmica, a qual pode inibir a obtenção de resultados. Neste caso seria necessário alargar a gama de temperaturas no sentido das menores temperaturas. Tendo isto em consideração, apenas a informação extrapolada a partir da imagem do ensaio Gest2019_02 foi analisada em profundidade.

Através da manipulação da gama de temperaturas na imagem de controlo obtida no ensaio Gest2019_02 com recurso ao software ThermaCAM, foi possível verificar que à temperatura de 270°C (543K) é possível segmentar completamente a frente de fogo das chamas, sendo que a frente chegou em alguns momentos do ensaio a 833°C (1106K), observando-se nesta fase alguma saturação do sensor. Isto permitiu inferir acerca da adequação do sensor utilizado na plataforma aérea à visualização da frente de fogo. As temperaturas verificadas para a frente correspondem então à gama espectral entre **$2.62\mu\text{m}$** e **$5.34\mu\text{m}$** . Dado que o sensor utilizado na plataforma aérea está otimizado para captação entre **$8\mu\text{m}$** e **$14\mu\text{m}$** , verifica-se a inadequação do sensor à visualização da frente de fogo. Com efeito, este sensor permite, por outro lado, a captação das chamas e da área ardida.

Para que o processo de identificação da frente fosse o mais fidedigna possível, manipulou-se a imagem do ensaio Gest2019_02 de forma a que fosse possível distinguir, na medida do possível, as chamas em relação à frente de fogo. Para o efeito recorreu-se ao software *Adobe Premiere*, que permitiu a criação de um filme composto através da sobreposição e desfasamento das faixas de imagem térmica aérea, triplicadas e saturadas na paleta RGB. Este processo mostrou-se em grande parte eficaz, revelando-se apenas numa instância a identificação das chamas ao invés da frente, perceptível devido à identificação de um recuo aparente (falso) da frente de fogo.

Da análise dos *frames* extraídos do filme compósito concluiu-se que nem todos poderiam ser incluídos nos processos de identificação da frente ou no cálculo de parâmetros. Por exemplo, os *frames* relativos aos instantes de aquisição de imagem à altitude de 10mAGL dizem respeito a uma fase em que a frente de fogo não se encontra desenvolvida. Os *frames* relativos aos instantes de aquisição de imagem à altitude de 40mAGL dizem respeito a uma fase de extinção do incêndio, tendo sido igualmente descartados da análise.

Numa fase anterior ao processo de identificação da frente de fogo foi necessário fazer o levantamento dos focos introduzidos pela equipa do CEIF junto à frente de fogo. Estes focos foram incluídos como parte da frente de fogo sempre que revelassem proximidade e interação com a frente principal (i.e.: o foco mais desenvolvido) em algum momento do desenvolvimento do incêndio. A introdução destes focos tornou mais complexo o processo de identificação da frente de fogo e o cálculo de parâmetros, devido à variabilidade comportamental que induzem nos flancos da frente de fogo, principalmente na ordenada $y = 4m$ da parcela. Esta variabilidade leva à existência de vários pontos representativos de uma frente na mesma ordenada da parcela, o que causou problemas ao processo de localização geográfica da frente. Não sendo claro qual o ponto que seria considerado pela folha de cálculo no processo de atribuição de coordenadas geográficas e no cálculo automático de parâmetros, seguindo a lógica da propagação do fogo, foi necessário eliminar todos os pontos que pudessem causar dúvidas nesse processo.

A identificação da frente de fogo, tal como todas as operações realizadas doravante, foi feita de forma individual para as diferentes altitudes de teste, ou seja, individualizada para cada um dos conjuntos de instantes pertencentes a cada uma das altitudes realizadas pelo VANT tático: 15mAGL, 20mAGL, 25mAGL, 30mAGL e 35mAGL. O processo de identificação da frente de fogo foi realizado de forma manual com recurso ao software MicroStation95, a partir do qual se geraram gráficos representativos da evolução do incêndio durante cada um dos patamares de altitude. A partir da aglomeração de todos os gráficos elaborou-se de forma individual para a imagem aérea e de controlo, um gráfico representativo da evolução total do ensaio.

A partir do levantamento das coordenadas do ponto de referência da parcela (identificado como *A* no capítulo 7.7), ao qual se referenciaram as linhas representativas da frente de fogo no processo anterior, foi possível atribuir coordenadas geográficas à frente de fogo. Para a sua representação geográfica optou-se por seleccionar apenas 15 pontos de cada

linha representativa da frente de fogo nos vários instantes, representado as ordenadas pares da parcela. Os passos tomados até este ponto verificaram a possibilidade da deteção e geolocalização da frente de fogo com coordenadas geográficas. Este último ponto tem particular interesse, sendo que a localização da frente de incêndio em coordenadas geográficas é um dos dados indispensáveis à realização de uma simulação de previsão do comportamento e evolução do fogo.

Seguidamente ao processo de referenciação geográfica da frente procedeu-se ao cálculo de parâmetros característicos do fogo, nomeadamente a velocidade instantânea de propagação, intensidade de propagação do fogo e velocidade média de propagação.

Relativamente ao cálculo da velocidade instantânea de propagação e, conseqüentemente, da intensidade de propagação, observou-se que nem sempre existe um ponto da frente de fogo nas ordenadas escolhidas para a realização dos cálculos. Este cenário verifica-se nos flancos da frente, particularmente nos instantes que antecedem o fim do ensaio, onde a frente tem tendência a diminuir a sua dimensão no sentido das ordenadas médias da parcela. Os valores calculados nos momentos em que este cenário se regista foram evidenciados nas tabelas a vermelho.

Verificou-se também a existência de valores de velocidade de propagação negativos, os quais se apresentam a sublinhado nas tabelas de valores. Estes valores devem-se a uma de três razões:

- Como anteriormente referido, o método dos filmes compósitos não demonstra eficácia absoluta, sendo que a identificação da frente de fogo, decorrente da imagem aérea, em momentos de maior atividade das chamas pode não ser representativa da frente de fogo. Assim podem-se revelar retrocessos da frente falsos, devido à identificação de chamas ao invés da frente.
- Valores negativos de velocidade podem-se também registar devido ao já referido caso de não existirem pontos representativos da frente de fogo na ordenada da parcela considerada. Esta situação foi observada particularmente nos momentos finais do ensaio, quando o fogo se apresenta em fase de extinção. Estes valores não são válidos para análise, dado não serem representativos da realidade.
- O terceiro cenário possível deve-se à variabilidade da forma dos flancos da frente, onde são introduzidos focos pela equipa do CEIF. Estes geram uma ação

aproximadora entre os focos e a frente principal, tendo-se registado este comportamento em alguns momentos. Além disso alguns destes focos de ignição, após atingirem uma dimensão considerável, fragmentam-se, existindo extinção de alguns dos fragmentos. Dado que se incluíram todos os focos que interagissem com a frente principal, estes dois comportamentos originam um retrocesso da frente, resultando em valores de velocidade instantânea negativa. Apesar de apenas terem sido registados dois valores como consequência destes comportamentos, este cenário verifica-se ciclicamente durante o decorrer de todo o ensaio, particularmente no flanco da frente na região junto da ordenada $y = 4m$ da parcela, devido à introdução recorrente de novos focos de ignição pela equipa do CEIF.

Comparando os valores obtidos para os valores de velocidade instantânea de propagação a partir da imagem aérea e de controlo, verificou-se que existem diferenças nos resultados. No entanto, os padrões de evolução dos valores nas ordenadas da parcela ao longo do tempo são semelhantes. A partir da análise dos gráficos da **Figura 7.13** verificou-se que os valores de velocidade variam substancialmente nas regiões dos flancos da frente de fogo, particularmente na ordenada $y = 4m$ da parcela. Isto deve-se mais uma vez à influência dos focos de ignição e da sua interação com a frente de fogo. Comparando a variação de velocidade instantânea nas ordenadas médias da parcela, verificou-se que o fogo se propaga em condições mais estáveis. Concluiu-se que a análise da propagação do fogo nas ordenadas médias é mais fiável e representativa do comportamento de um incêndio real.

O padrão de evolução da intensidade é semelhante ao da velocidade instantânea. Considerando apenas as ordenadas médias da parcela, foi registado o máximo de intensidade aproximadamente a meio do ensaio, com valor de $5.87kW/m$ no caso da imagem aérea e $5.06 kW/m$ para o caso da imagem de controlo. Estes valores servem de referência à dimensão do ensaio e aos meios de combate que deveriam ser mobilizados para o seu controlo.

O cálculo da velocidade média de propagação foi realizado individualmente para os conjuntos de instantes pertencentes a um determinado patamar de altitude de teste e para cada ordenada par da parcela. Elaboraram-se então 4 gráficos que têm como objetivo evidenciar as diferenças existentes entre os valores de velocidade média calculados a partir

da imagem aérea e de controlo. A partir do cálculo do desvio (RMS) foi possível contabilizar esta diferença.

Os valores de desvio obtidos para a totalidade da frente são significativos, registando-se valores entre 2% e 12,62%, sendo que o mínimo se verifica para o conjunto de instantes a 15mAGL e o máximo a 20mAGL. Da análise do gráfico que compara o desvio obtido às diferentes atitudes, considerando a totalidade da frente e apenas as ordenadas médias da parcela, observa-se maior estabilidade nos desvios calculados para as ordenadas médias, bem como valores consideravelmente mais reduzidos, compreendidos entre 0.3% (20mAGL) e 3.6% (25mAGL). Conclui-se que o maior erro associado à consideração da totalidade da frente no cálculo do desvio se deve novamente aos focos de ignição, os quais induzem um comportamento dinâmico na região dos flancos da frente de fogo.

Da análise dos valores de desvio verificou-se que não existe um padrão definido nos valores de desvio com relação à altitude, portanto não foi possível retirar conclusões com aplicabilidade prática acerca da evolução da precisão dos parâmetros extrapolados do fogo com a altitude, no âmbito do projeto FIREFRONT. No entanto, os reduzidos valores de desvio obtidos para a imagem aérea indicam que existe possibilidade da localização geográfica da frente alimentar um simulador da frente de fogo.

Reforçaram-se também com este trabalho as vantagens da aquisição de imagem térmica sobre ensaios de campo com recurso a VANTs de perfil tático. Com efeito, o uso de VANTs oferece uma vista aérea privilegiada do evento, sendo possível captar maior detalhe da evolução da frente, contornando problemas de perspectiva e oclusão da frente devido a obstáculos físicos como vegetação alta, quando comparado com a aquisição estática no solo. Além disso estas plataformas permitem uma mobilização rápida, elevada proximidade ao evento se desejável, alta flexibilidade de posicionamento e estabilidade durante o voo. No entanto, como já referido, existe a limitante imposta pela velocidade do vento. É também necessário relevar que um VANT como o utilizado durante os ensaios realizados no âmbito deste trabalho, pode ter um custo de cerca de dez vezes inferior ao de uma câmara como a utilizada no grupo de controlo. Assim, evidenciam-se as vantagens deste método de aquisição de imagem térmica em relação aos atualmente utilizados pelo CEIF, podendo reverter-se em redução de custos para o laboratório.

Como nota final, refere-se que neste trabalho se encontra desenvolvida uma metodologia para realização de ensaios de campo com recurso a VANTs de perfil estratégico, a qual poderá servir de base em experiências futuramente realizadas pelo CEIF.

9. TRABALHO FUTURO

No âmbito deste trabalho, existem alguns pontos que merecem refinação. Como trabalho futuro propõe-se o seguinte:

- O cálculo do erro através da estimativa da área ardida fornece valores que são transversais a qualquer parâmetro característico do fogo, em contraste à velocidade de propagação como referência ao cálculo, o qual fornece o desvio apenas dos parâmetros que têm como variáveis distância entre frentes e intervalos de tempo.
- A *working distance*, que no presente trabalho é entendida como a distância do sensor à parcela, deverá ser tratada futuramente como distância do sensor à frente de fogo. Este parâmetro deve ser medido automaticamente no momento dos ensaios. A mudança de métrica deverá produzir resultados mais fidedignos de desvio num estudo futuro (utilizando a metodologia proposta neste trabalho).
- No presente trabalho a identificação da frente e referenciação da frente foram feitas manualmente. Este processo exigiu uma carga temporal muito elevada, sendo que o fator humano carrega também alguma influência nos resultados. Esta influência não tem carácter negativo, sendo que o julgamento humano pode revelar-se decisivo e vantajoso. No entanto, este julgamento não é sistematizado. Assim deve ser encontrada uma solução mais atualizada de desenvolver este passo, com recurso a ferramentas de software mais avançadas.
- A refinação dos pressupostos a partir dos quais os planos de voo foram desenvolvidos devem ser objeto de continua refinação, nomeadamente o padrão de voo.
- Finalmente, para que este estudo seja realizado de forma integral, deve ser alargada a base de dados relativos a ensaios com incêndios de diferentes intensidades, onde, em cada um dos ensaios, fossem realizados os mesmos patamares de altitude, os quais deveriam ser vários escolhidos tendo em vista a

missão real a desempenhar. Os ensaios devem ser realizados sob uma metodologia específica, tal como a proposta neste trabalho, onde o ângulo de captação e distância à parcela sejam parametrizáveis. Isto possibilitaria relacionar a gama de altitudes ótima para aquisição de imagem térmica verificada para cada incêndio de determinada intensidade. Assim seria possível relacionar a intensidade com a altitude de voo ótima para minimização do desvio de resultados.

- Neste trabalho partiu-se do pressuposto que a deteção do menor foco se prende com a resolução espacial do sensor, apontando-se a presença de vapor de água na atmosfera como uma das principais causas da perda de informação térmica com a distância da fonte ao sensor. Desta forma, o presente estudo talvez possa ser conduzido no sentido de avaliar o teor de humidade relativa na atmosfera e o seu efeito na aquisição de imagem infravermelha à distância.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. X. Viegas, “Wildfires in Portugal,” *Fire Res.*, vol. 2, no. 1, p. 2018, 2018.
- [2] D. X. Viegas *et al.*, “O COMPLEXO DE INCÊNDIOS DE PEDRÓGÃO GRANDE E CONCELHOS LIMÍTROFES, INICIADO A 17 DE JUNHO DE 2017,” Coimbra, Portugal, 2017.
- [3] I. Novo, P. Pinto, J. Rio, and C. Gouveia, “Fires in Portugal on 15th October 2017: a Catastrophic Evolution,” in *Advances in forest fire research 2018*, 2018, pp. 57–70.
- [4] J. Williams, “Exploring the Onset of High-Impact Mega-Fires Through a Forest Land Management Prism,” *For. Ecol. Manage.*, vol. 294, pp. 4–10, 2013.
- [5] L. Merino, F. Caballero, J. R. Martínez-De-Dios, I. Maza, and A. Ollero, “An Unmanned Aircraft System for Automatic Forest Fire Monitoring and Measurement,” *J. Intell. Robot. Syst. Theory Appl.*, vol. 65, no. 1–4, pp. 533–548, 2012.
- [6] J. S. de Vries and R. A. W. Kemp, “Results with a Multispectral Autonomous Wildfire Detection System,” in *Infrared Technology XX*, 1994, vol. 2269, pp. 18–28.
- [7] D. X. Viegas, “Project Eagle: A Pilot Project on Forest Fire Detection in Central Portugal,” *Int. For. FIRE NEWS*, no. 23, pp. 99–102, 2000.
- [8] C. E. Premal and S. S. Vinsley, “Image Processing Based Forest Fire Detection,” *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 2, no. 2, pp. 87–95, 2014.
- [9] C. Yuan, Y. Zhang, and Z. Liu, “A Survey on Technologies for Automatic Forest Fire Monitoring, Detection, and Fighting Using Unmanned Aerial Vehicles and Remote Sensing Techniques,” *Can. J. For. Res.*, vol. 45, no. 7, pp. 783–792, 2015.
- [10] I. Walter, K. Briess, W. Baerwald, E. Lorenz, W. Skrbek, and F. Schrandt, “A Microsatellite Platform for Hot Spot Detection,” *Acta Astronaut.*, vol. 56, no. 1–2, pp. 221–229, 2005.
- [11] V. G. Ambrosia *et al.*, “Demonstrating UAV-Acquired Real-Time Thermal Data over Fires,” vol. 69, no. 4, pp. 391–402, 2003.
- [12] C. C. Wilson and J. B. Davis, “Forest Fire Laboratory at Riverside and Fire Research in California: Past, Present, and Future,” 1988.

-
- [13] A. Restas, “Forest Fire Management Supporting by UAV Based Air Reconnaissance Results of Szendro Fire Department, Hungary,” in *2006 1st International Symposium on Environment Identities and Mediterranean Area, ISEIM*, 2006, pp. 73–77.
- [14] U.S. Department of Defense, “Unmanned Aircraft Systems (UAS) Roadmap, 2005-2030,” 2005.
- [15] K. P. Valavanis and G. J. Vachtsevanos, “Selection of Appropriate Class UAS/Sensor to Support Fire Monitoring Experiences in the United States,” *Handbook of Unmanned Aerial Vehicles*, pp. 2723–2754, 2015.
- [16] L. Neto and M. Martins, *Manual Operacional - Emprego dos Meios Aéreos em Operações de Proteção Civil*, no. 1. Europress, 2009.
- [17] Peter W. Merlin, *Ikhana Unmanned Aircraft System : Western States fire missions*. NASA History Office, 2009.
- [18] V. G. Ambrosia and E. Hinkley, “Nasa Science Serving Society: Improving Capabilities for Fire Characterization to Effect Reduction in Disaster Losses,” *Int. Geosci. Remote Sens. Symp.*, vol. 4, no. 1, pp. 628–631, 2008.
- [19] D. Berlant, “Unmanned Aircraft is Latest Firefighting Tool.” pp. 12–13.
- [20] V. Ambrosia, J. Myers, and E. Hildum, “NASA’s Autonomous Modular Scanner (AMS) - Wildfire Sensor: Improving Wildfire Observations From Airborne Platforms,” in *34th International Symposium on Remote Sensing of Environment - The GEOSS Era: Towards Operational Environmental Monitoring*, 2011.
- [21] E. Pastor, C. Barrado, P. Royo, E. Santamaria, J. Lopez, and E. Salami, “Architecture for a Helicopter-Based Unmanned Aerial Systems Wildfire Surveillance System,” *Geocarto Int.*, vol. 26, no. 2, pp. 113–131, 2011.
- [22] B. LCdr Dave Ehredt, “NATO -Joint Air Power Competence Centre,” no. September 2009, pp. 61–62, 2010.
- [23] F. Esposito, G. Rufino, and A. Moccia, “Real-Time Detection of Fire Hotspots From Mini-UAV Based, Thermal InfraRed / VIS-NIR Hyperspectral Image Data,” in *AIAA Infotech at Aerospace Conference and Exhibit and AIAA Unmanned...Unlimited Conference*, 2009, no. April, pp. 1–18.
- [24] “PICTURES | UAVision Aeronautics.” [Online]. Available: <https://www.uavision.com/pictures>. [Accessed: 02-Sep-2019].

- [25] “Aero Club de Torres Vedras (ACTV) aviation photos on JetPhotos.” [Online]. Available: [https://www.jetphotos.com/airline/Aero Club de Torres Vedras \(ACTV\)](https://www.jetphotos.com/airline/Aero Club de Torres Vedras (ACTV)). [Accessed: 08-Sep-2019].
- [26] D. X. Viegas, “Extreme Fire Behaviour,” no. v.
- [27] *MANUAL VFR. NAV - AIS Portugal*, 2015.
- [28] *GUIA DE UTILIZAÇÃO DO ESPAÇO AÉREO*. Autoridade Nacional de Aviação Civil.
- [29] P. A. Werth *et al.*, “Synthesis of Knowledge of Extreme Fire Behavior: Volume 2 for Fire Behavior Specialists, Researchers, and Meteorologists,” *Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-891*, vol. 2, no. March, p. 258, 2016.
- [30] G. M. Byram, “Atmospheric Conditions Related to Blowup Fires,” 1954.
- [31] J. J. O’Brien *et al.*, “High-Resolution Infrared Thermography for Capturing Wildland Fire Behaviour - RxCADRE 2012,” *Int. J. Wildl. Fire*, vol. 25, no. 1, pp. 62–75, 2016.
- [32] Washington State Department of Transportation, Ed., “11. Visual Search Patterns,” in *Aviation Emergency Services Aircrew Training Reference Text*, no. March, 2008.
- [33] “Mavic 2 Enterprise - Built to Empower. Destined to Serve - DJI.” [Online]. Available: <https://www.dji.com/pt/mavic-2-enterprise>. [Accessed: 02-Sep-2019].
- [34] “SC600 Handheld Series Infrared Cameras from FLIR Systems, Inc. | Labcompare.com.” [Online]. Available: <https://www.labcompare.com/1521-IR-Cameras-Infrared-Thermal-Camera/4865-SC600-Handheld-Series-Infrared-Cameras/>. [Accessed: 03-Sep-2019].
- [35] D. Bruce, “Forest Fire Control and Use,” *Ecology*, vol. 42, no. 3, pp. 609–610, 1961.

ANEXO A – FOLHA PARA CÁLCULO DE COORDENADAS DO PADRÃO DE VOO

Para definição das coordenadas do padrão de voo para os ensaios foi desenvolvida uma folha de cálculo (Excel). Este problema é de índole fundamentalmente geométrica. Através da definição e atribuição de valores a um determinado número de *inputs* (todos modificáveis), a folha devolve *outputs* tais como as coordenadas do padrão de voo e outros necessários para saber se os requisitos de altitude mínima são cumpridos, sendo devolvidos ainda algumas medidas indicativas. Nas tabelas seguintes encontram-se a lista de variáveis principais de entrada e de saída (I/O), bem como os valores de *inputs* que se utilizaram e não se variaram para o estabelecimento do plano de voo dos diversos ensaios. Foi utilizado um sensor de reduzidas dimensões de forma a que os resultados dos *outputs* da folha de cálculo, como a área captada no solo, sejam conservativos.

Tabela A.1: descrição dos *inputs* da folha de cálculo de coordenadas da padrão de voo

Inputs		
Parâmetros do sensor	Ângulo de FOV [°]	20
	Largura, horizontal [px]	640
	Comprimento, vertical [px]	512
Parâmetros de aquisição	Working distance [m]	*varia*
	Ângulo da câmara [°]	*varia*
Dados da região	Altura do obstáculo mais elevado da região [mAGL]	130
	Altitude máxima (orografia) [mASL]	1205
	Declive do terreno [°]	15
Parâmetros do padrão de voo	Tempo entre coordenadas [s]	6
	Velocidade da aeronave [knots]	50
	Duração de meia volta [s]	60
	Distância entre pernas [m]	500
	Duração do ensaio [s]	10
Dados da parcela	Largura [m]	*varia*
	Comprimento [m]	*varia*
	Tabela de coordenadas geométricas da parcela [mN, mE]	*varia*
	Inclinação da parcela com o Norte geográfico (limite inf.) [°]	27.0
	Altitude do limite superior da parcela [mASL]	*varia*

Tabela A.2: descrição dos *outputs* da folha de cálculo de coordenadas da padrão de voo

Outputs	
Dados do padrão de voo	Altitude ASL [ft]
	Distância ao ponto mais elevado da região [ft]
Dados das pernas do padrão de voo	Coordenadas dos waypoints [mN, mE]
	<i>Ground distance</i> ao topo da parcela [m]
	Inclinação vertical da câmara [°] (perna 2)
	<i>Working distance</i> ao CG da parcela [ft] (perna 2)
Outros outputs	Área captada [km^2]
	Vantagem da área captada <i>nadir vs off-nadir</i> [%]
	Distância de <i>clearance</i> para aquisição de fotografamas [m]
	Distância entre coordenadas consecutivas [m]
	Nº de circuitos completos por ensaio

Os *parâmetros do sensor* são necessários para conhecer a menor *área captada* durante o percurso do padrão de voo, calculada então para o ponto médio da primeira perna. Dado que não existem dados disponíveis acerca das características do sensor que será utilizado durante os ensaios, tiveram-se em conta os parâmetros do sensor descritos na tabela que deverão ser suficientes para gerar uma boa aproximação da área captada.

É importante referir que o tratamento dos parâmetros da câmara foi feito tendo em consideração o modelo *pinhole camera*.

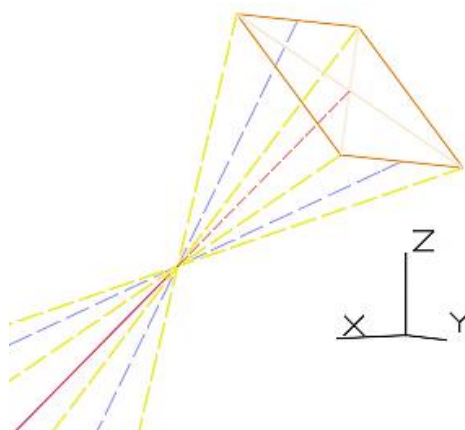


Figura A.1: Modelo *pinhole camera*, e principais linhas usadas como referência no cálculo da *working distance*

A **Figura A.1** representa este modelo, sendo que o foco da lente (*pinhole*) se situa na interseção de todas as linhas a tracejado. O ângulo de FOV define o ângulo do cone que resulta da convergência da luz na lente. Conjugado com o tamanho do sensor (a laranja), de modo a que os seus vértices intersectem o perímetro da base do cone, é definida a distância entre a lente e o sensor (*focal length*), representado a tracejado cor de rosa. Isto permite conhecer os ângulos horizontais (a tracejado amarelo) e verticais (a tracejado azul) do campo de visão relativos ao sensor (linhas a tracejado amarelo), definindo a dimensão da imagem captada. A área captada será então função da *working distance*, distância da lente ao objeto de estudo (linha contínua a cor de rosa). A simplificação deste modelo tem um problema. Se a distância entre a lente e o sensor for tida como descrito anteriormente, é causado efeito de vinheta nos cantos da imagem final, pelo que a distância entre a lente e o sensor deve ser superior à calculada.

Os **parâmetros de aquisição** traduzem-se nas duas variáveis independentes escolhidas para o estudo do trabalho. Estas têm implicações na localização geométrica de todo o padrão de voo em relação à parcela, sendo que todos os *outputs* são função direta ou indireta destes dois *inputs*.

Os **dados da região** têm influência na verificação da altitude máxima, sendo que o declive do terreno, influencia diretamente a área captada.

Os **parâmetros de voo** têm implicações na localização das coordenadas do padrão, ou *waypoints*. Com efeito, a conjugação da velocidade da aeronave com o tempo entre coordenadas estabelece a distância entre os *waypoints* A1 e A2, A3 e A4, bem como de B1 e B2, e, B3 e B4. Estes intervalos são de curta duração e têm a finalidade oferecer ao piloto uma oportunidade para recuperar da volta (A1 e A2 por exemplo) e preparar a manobra (A3 e A4 por exemplo). Um grande tempo entre coordenadas limita o número de circuitos que se podem realizar durante um ensaio, dado que é despendido muito tempo em manobras da aeronave, nomeadamente na realização de *meias voltas* entre pernas. Dado que se desejam fotografias consideravelmente intervalados no tempo, o tempo entre coordenadas é reduzido, aumentando o *número de circuitos completos num ensaio*.

Os **dados da parcela**, nomeadamente a *tabela de coordenadas geométricas da parcela*, *inclinação da parcela com o Norte geográfico* e a *altitude do limite superior da parcela* são essenciais para localizar geograficamente o padrão de voo. A largura e comprimento habilitam o cálculo da *distância entre as coordenadas* A2 e A3, bem como de

B2 e B3. A distância entre estas coordenadas é a ótima para se realizar a aquisição de fotogramas, traduzindo-se na fração da perna durante a qual é possível captar em todos os momentos a parcela (sem rodar a câmara ou alterar o seu ângulo). Isto não significa que seja necessário realizar a captação de uma forma tão rígida.

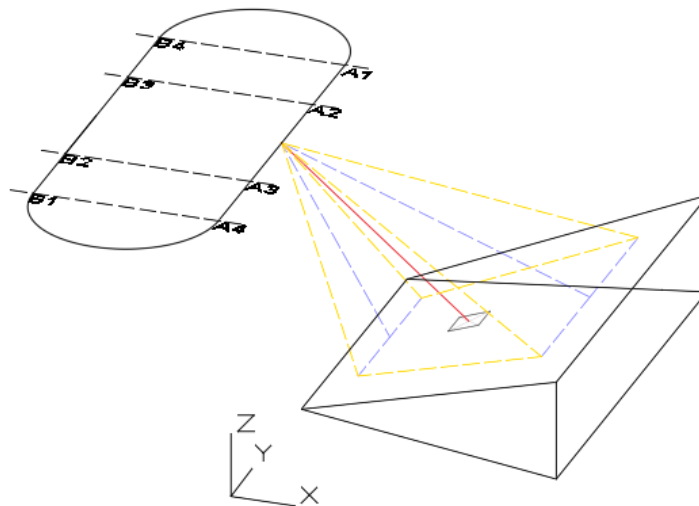


Figura A.2: Representação do padrão de voo, *waypoints* e área captada num terreno com declive

Com respeito ao padrão de voo estabelecido, a folha de Excel calcula primeiramente 4 coordenadas da perna 1: A1, A2, A3 e A4. As coordenadas da segunda perna são calculadas com base no raio necessário para a aeronave descrever a volta, considerando-se 250m para esse raio. São então calculadas 4 coordenadas para a segunda perna, B1, B2, B3 e B4. Dado que esta se situa numa posição mais afastada da frente, calculou-se o ângulo da câmara e *working distance* à parcela resultantes. Com os parâmetros discretizados na tabela de *inputs* a segunda perna resulta num aumento do *working distance* de 500' em relação à primeira. A segunda perna serve então de segundo teste.

A figura acima serviu de referência ao cálculo dos vários parâmetros geométricos na folha de cálculo, a qual apresenta um cenário semelhante ao das parcelas dos ensaios. As linhas a tracejado amarelo e azul representam respetivamente as linhas de campo de visão horizontal e vertical. Note que a área captada no solo, delimitada pelas linhas a tracejado amarelo e azul, tem a forma de um trapézio que muda de forma consoante a *working distance*, a rosa, e o ângulo da câmara em relação à vertical. O padrão de voo está marcado a preto com os *waypoints* assinalados.

ANEXO B – FRAMES EXTRAÍDOS DO FILME COMPÓSITO, GEST2019_02 – IMAGEM AÉREA

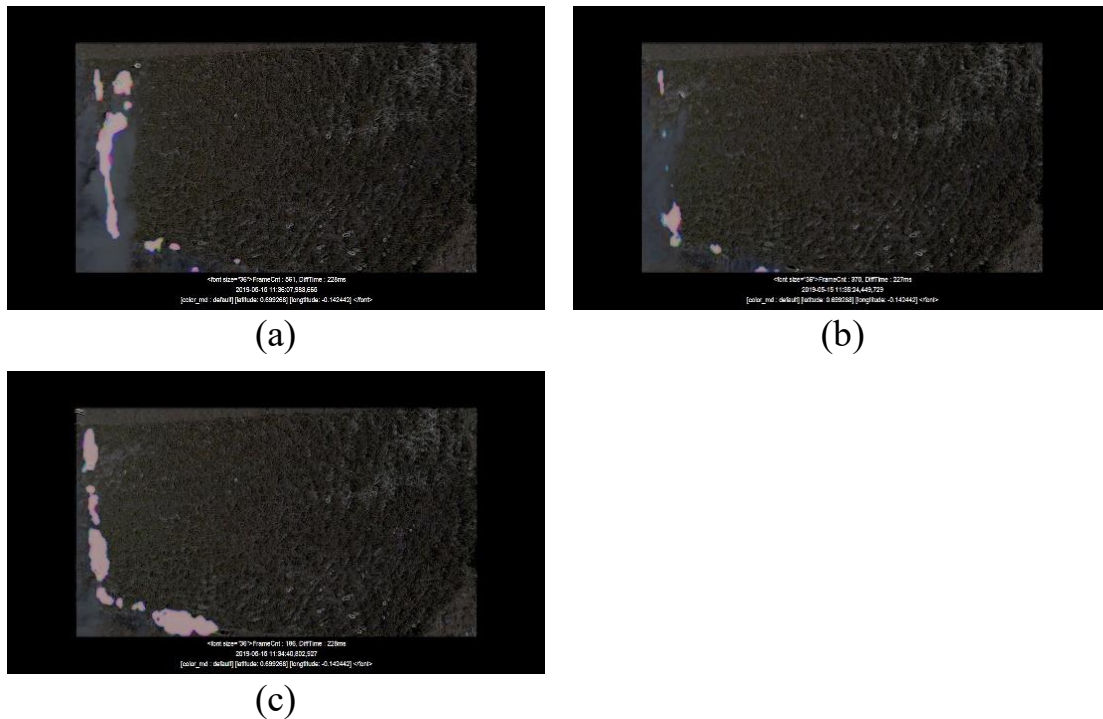


Figura B.1: *Frames* extraídos do vídeo composto, ensaio Gest2019_02, a 10mAGL, na ordem: (a), (b), (c), (d)

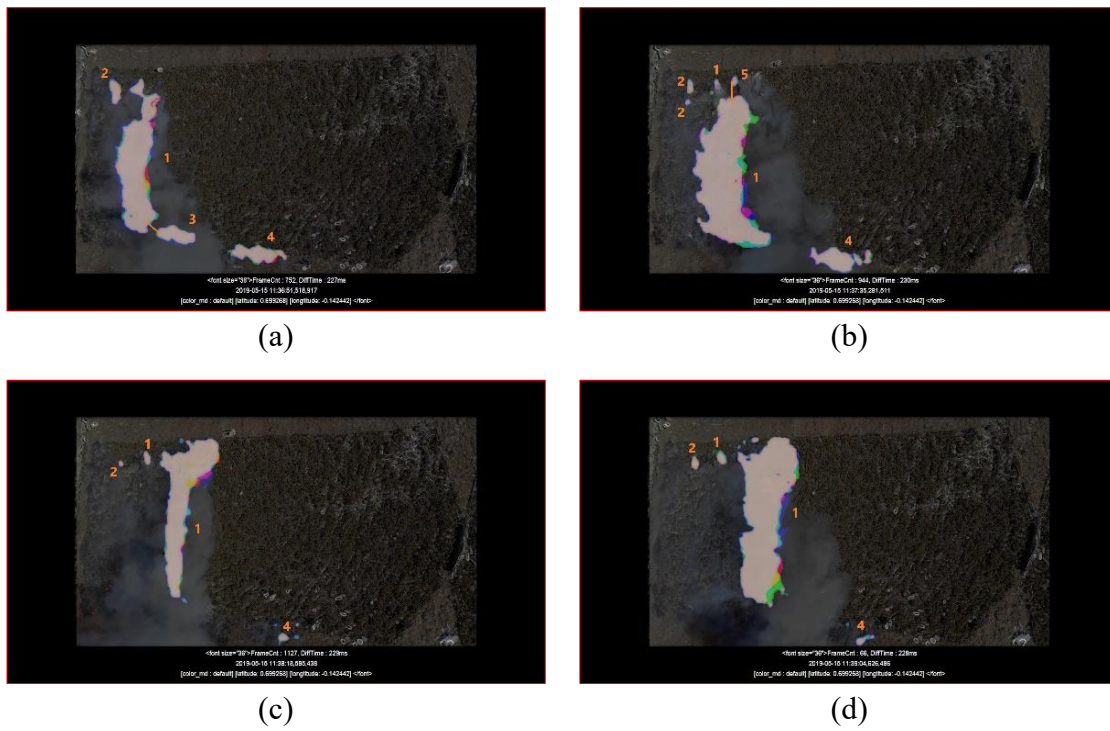


Figura B.2: *Frames* extraídos do vídeo composto, ensaio Gest2019_02, a 15mAGL, na ordem: (a), (b), (c), (d)

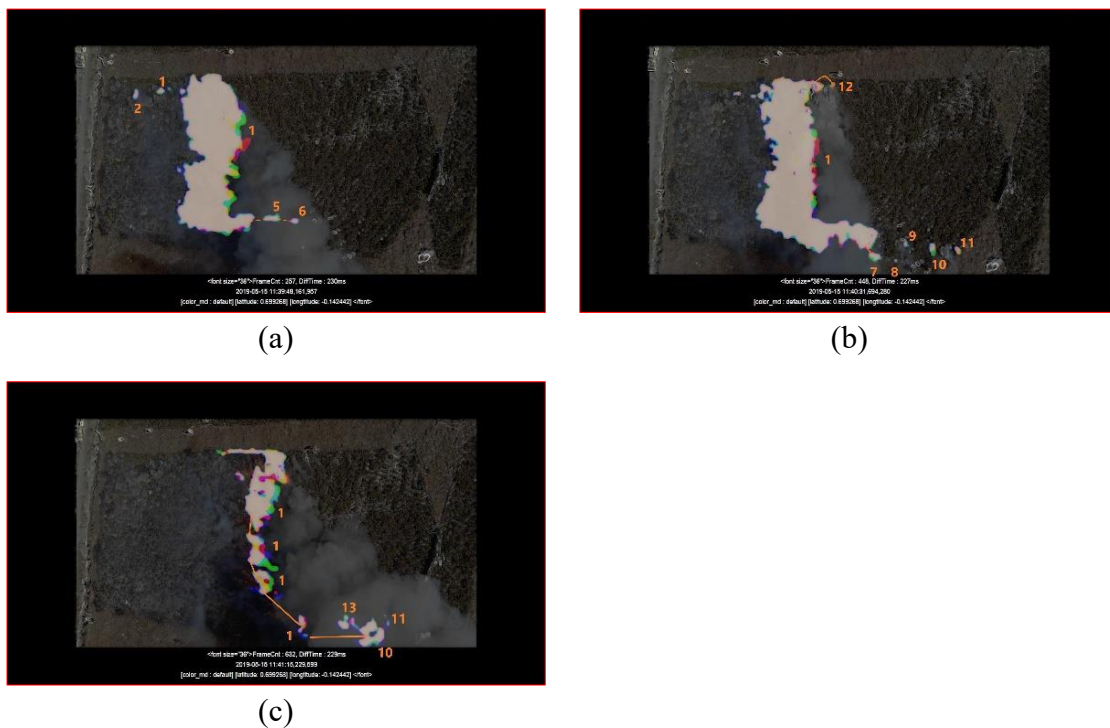
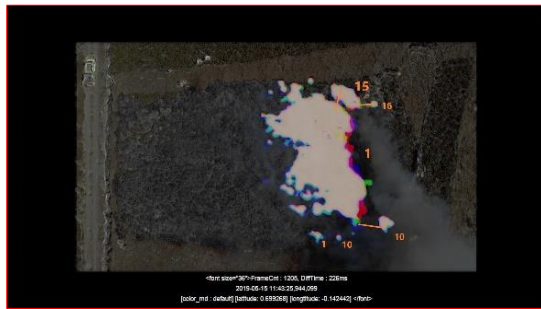


Figura B.3: *Frames* extraídos do vídeo composto, ensaio Gest2019_02, a 20mAGL, na ordem: (a), (b), (c), (d)



(a)

(b)



(c)

Figura B.4: *Frames* extraídos do vídeo compósito, ensaio Gest2019_02, a 25mAGL, na ordem: (a), (b), (c), (d)



(a)



(b)



(c)

Figura B.5: *Frames* extraídos do vídeo compósito, ensaio Gest2019_02, a 30mAGL, na ordem: (a), (b), (c), (d)

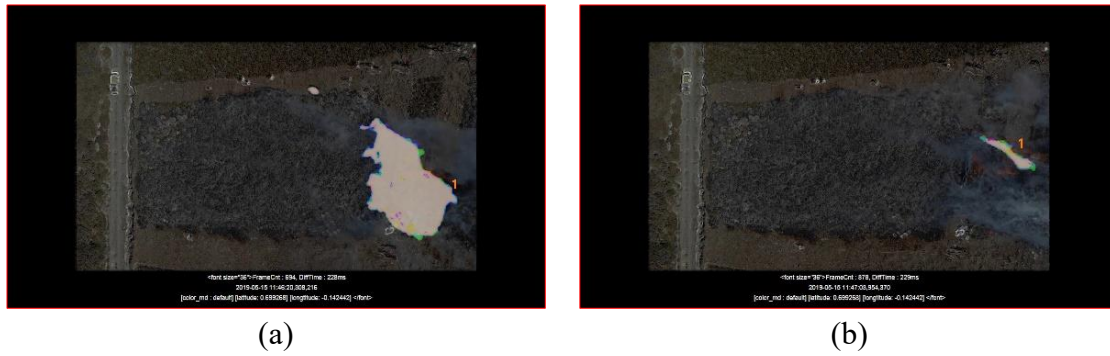


Figura B.6: *Frames* extraídos do vídeo composto, ensaio Gest2019_02, a 35mAGL, na ordem: (a), (b), (c), (d)

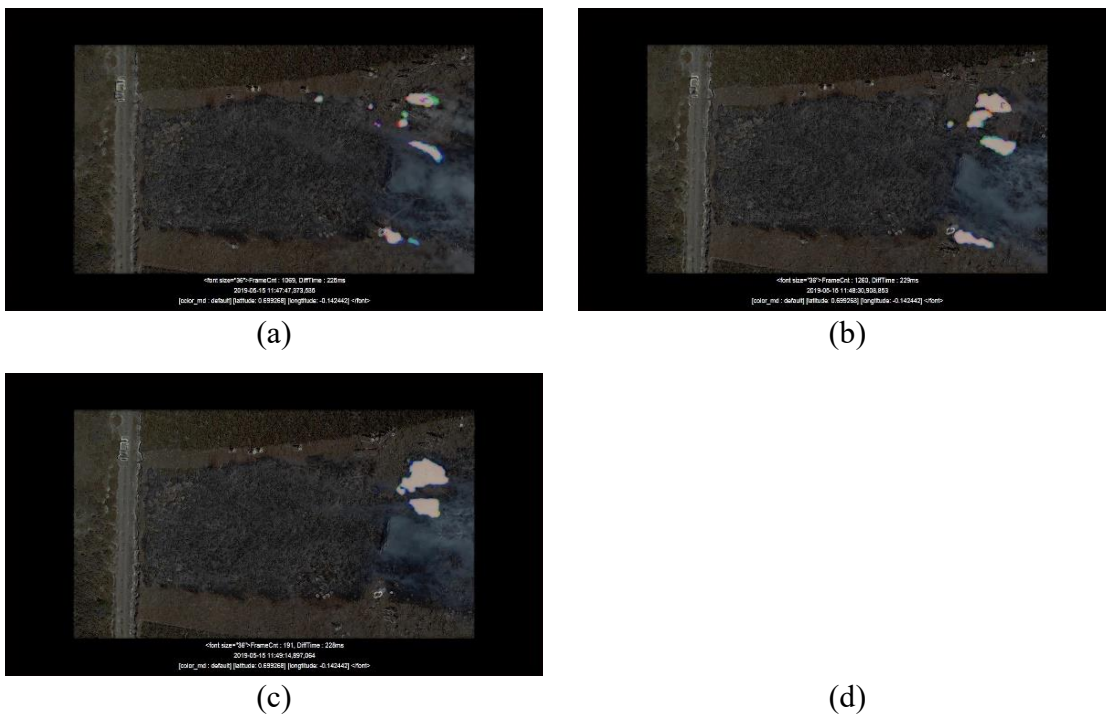


Figura B.7: *Frames* extraídos do vídeo composto, ensaio Gest2019_02, a 40mAGL, na ordem: (a), (b), (c), (d)

ANEXO C – FRAMES EXTRAÍDOS DO GRUPO DE CONTROLO, GEST2019_02– IMAGEM DE CONTROLO

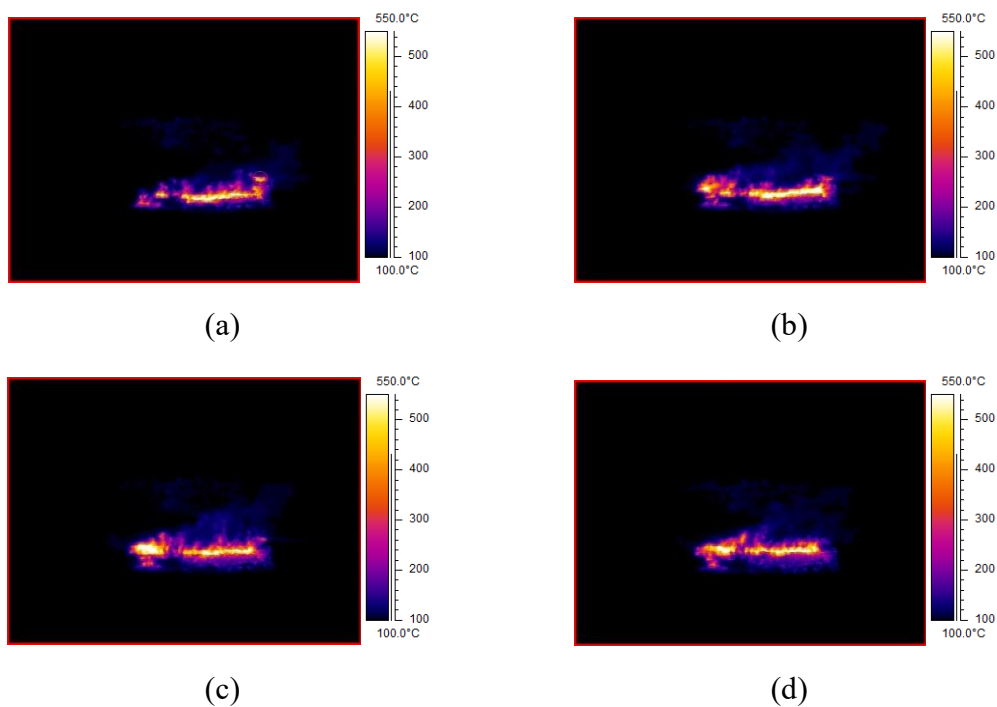


Figura C.1: *Frames* extraídos da imagem de controlo, ensaio Gest2019_02, correspondentes ao conjunto de instantes a 40mAGL, na ordem: (a), (b), (c), (d)

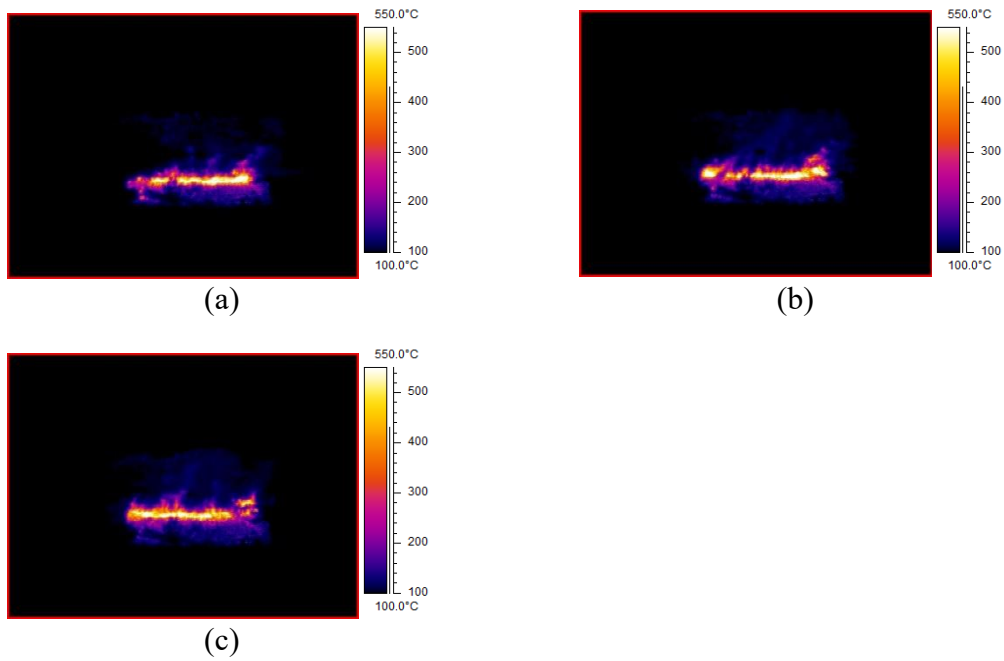


Figura C.2: *Frames* extraídos da imagem de controlo, ensaio Gest2019_02, correspondentes ao conjunto de instantes a 20mAGL, na ordem: (a), (b), (c)

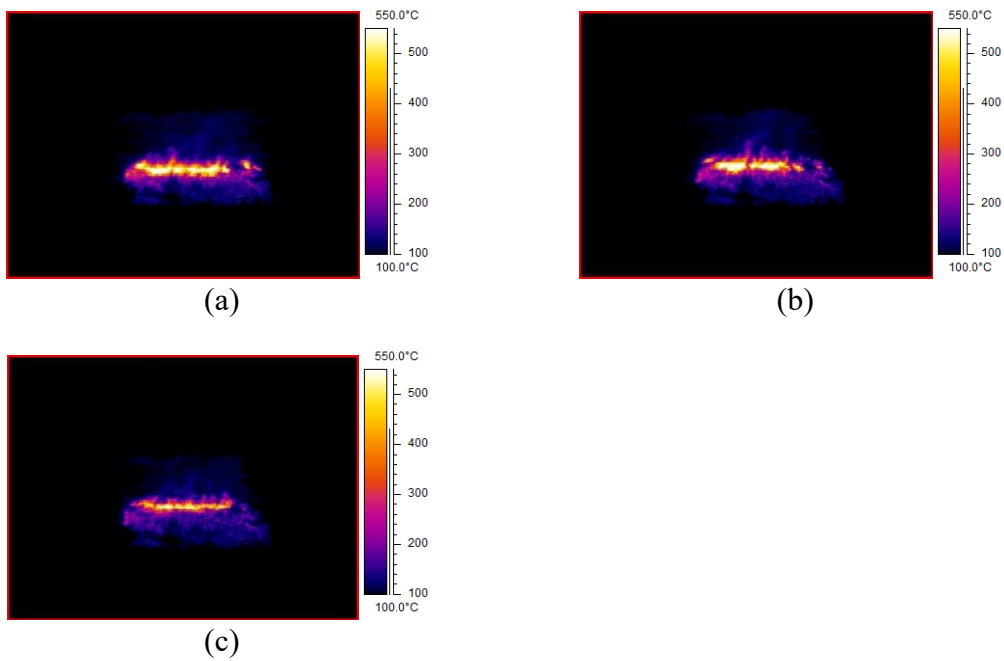


Figura C.3: *Frames* extraídos da imagem de controlo, ensaio Gest2019_02, correspondentes ao conjunto de instantes a 25mAGL, na ordem: (a), (b), (c)

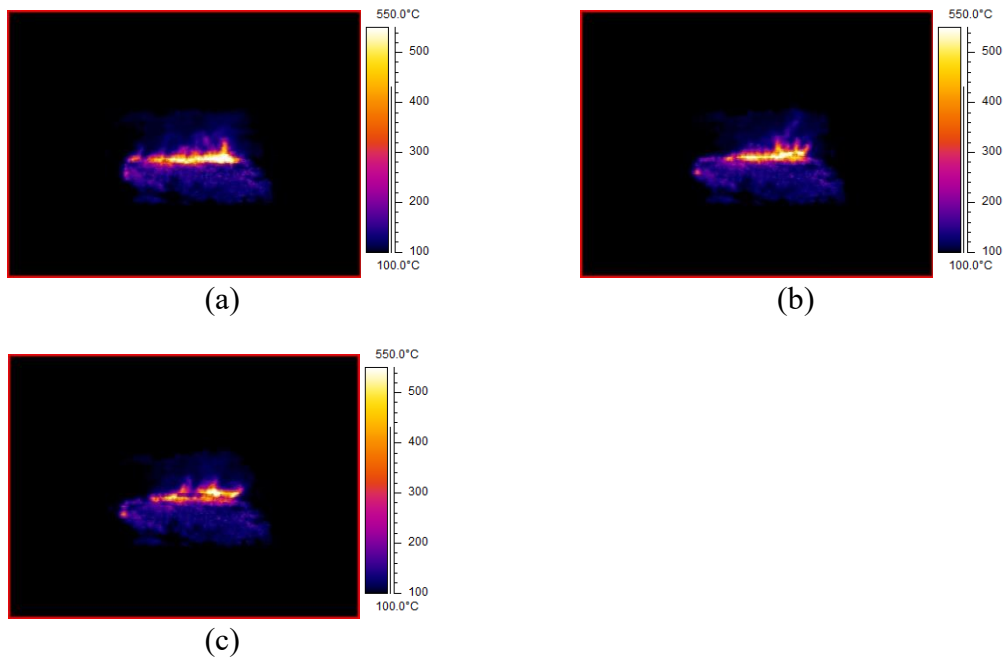


Figura C.4: *Frames* extraídos da imagem de controlo, ensaio Gest2019_02, correspondentes ao conjunto de instantes a 30mAGL, na ordem: (a), (b), (c)

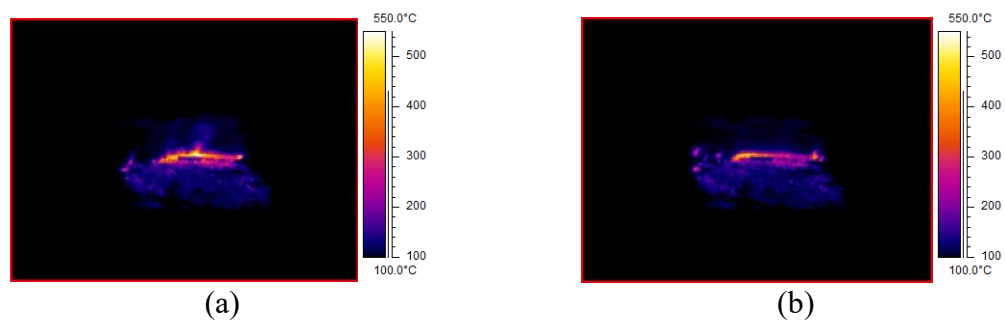


Figura C.5: *Frames* extraídos da imagem de controlo, ensaio Gest2019_02, correspondentes ao conjunto de instantes a 35mAGL, na ordem: (a), (b)

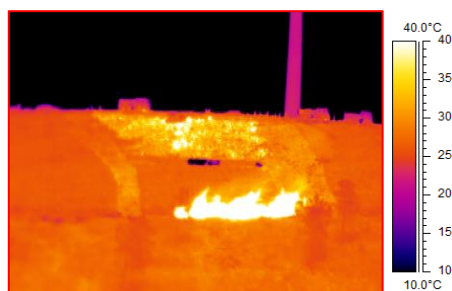


Figura C.6: *Frame* para extrapolação dos vértices da parcela, extraído da imagem de controlo, ensaio Gest2019_02

ANEXO D – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA FRENTE DE FOGO, GEST2019_02 - IMAGEM AÉREA

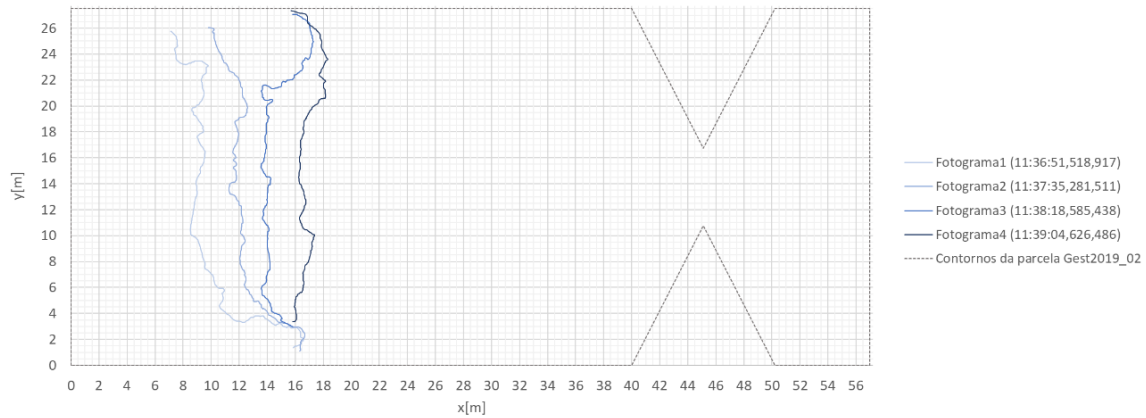


Figura D.1: Representação gráfica da frente de fogo nos instantes decorridos a 15mALG, imagem aérea, Gest2019_02

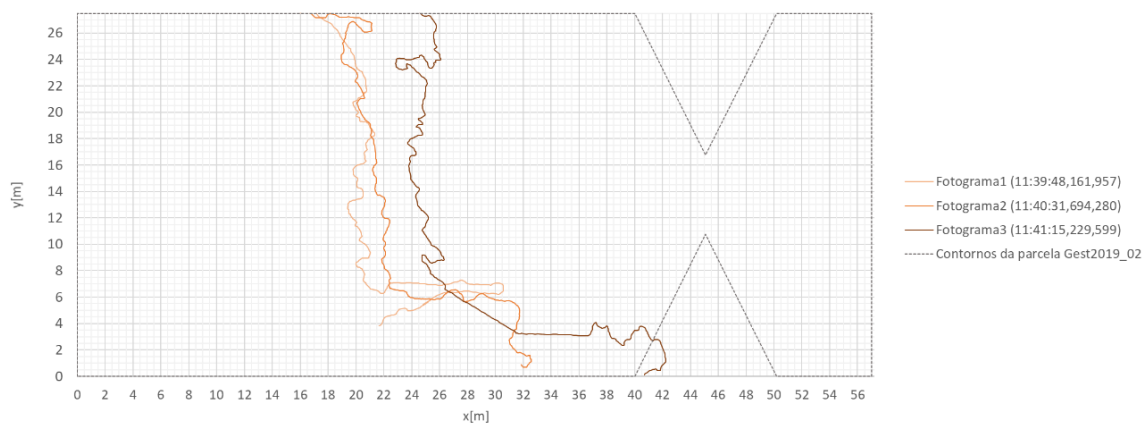


Figura D.2: Representação gráfica da frente de fogo nos instantes decorridos a 20mALG, imagem aérea, Gest2019_02

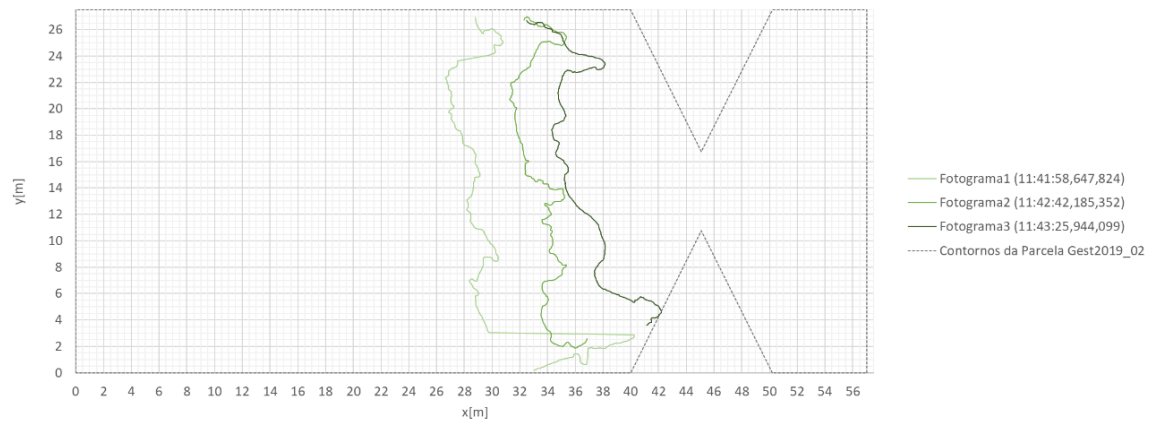


Figura D.3: Representação gráfica da frente de fogo nos instantes decorridos a 25mALG, imagem aérea, Gest2019_02

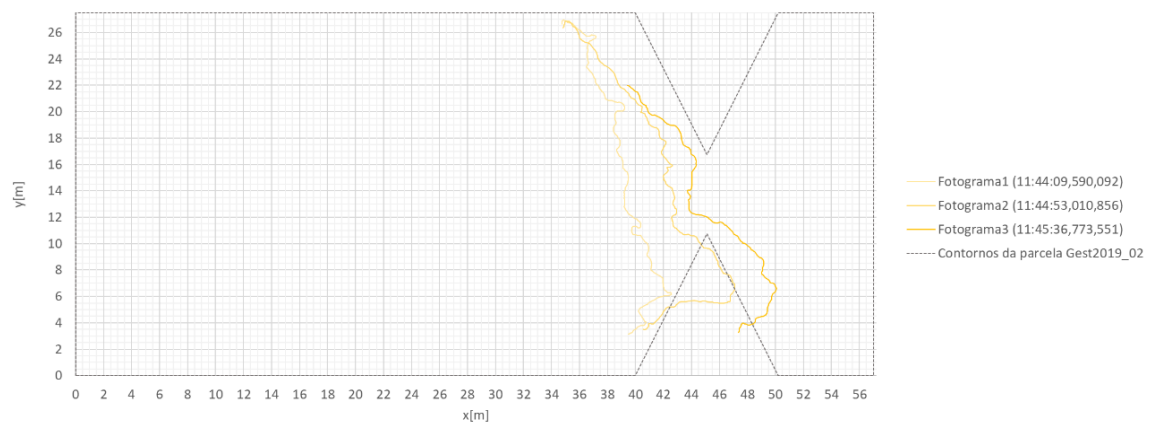


Figura D.4: Representação gráfica da frente de fogo nos instantes decorridos a 30mALG, imagem aérea, Gest2019_02

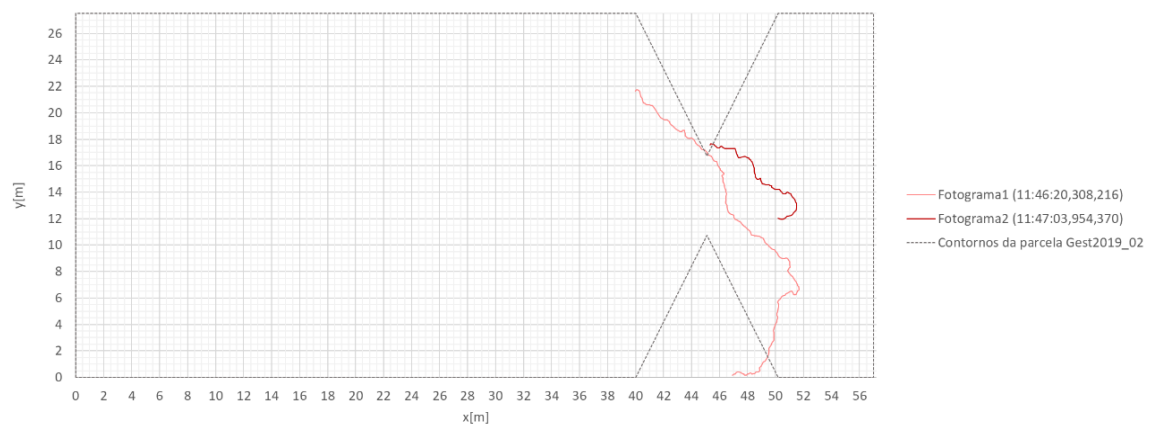


Figura D.5: Representação gráfica da frente de fogo nos instantes decorridos a 35mALG, imagem aérea, Gest2019_02

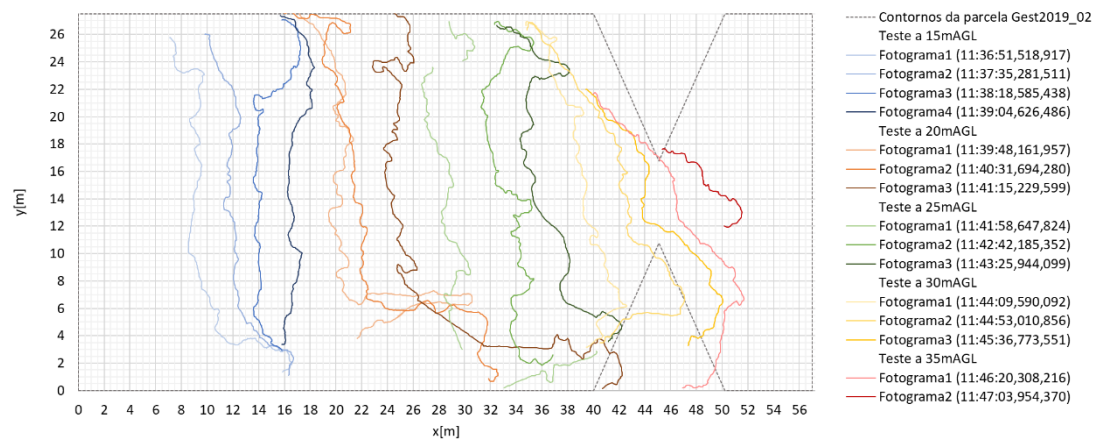


Figura D.6: Representação gráfica da frente de fogo nos instantes obtidos nos patamares de altitude realizados entre 15mALG e 35mAGL, imagem aérea, Gest2019_02

ANEXO E – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA FRENTE DE FOGO, GEST2019_02 - IMAGEM DE CONTROLO

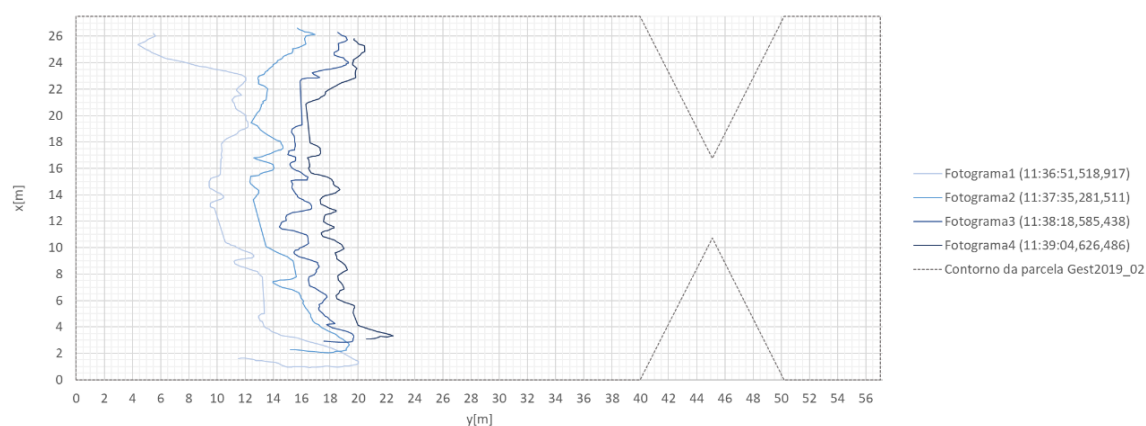


Figura E.1: Representação gráfica da frente de fogo nos instantes decorridos a $15mALG$, imagem de controlo, Gest2019_02

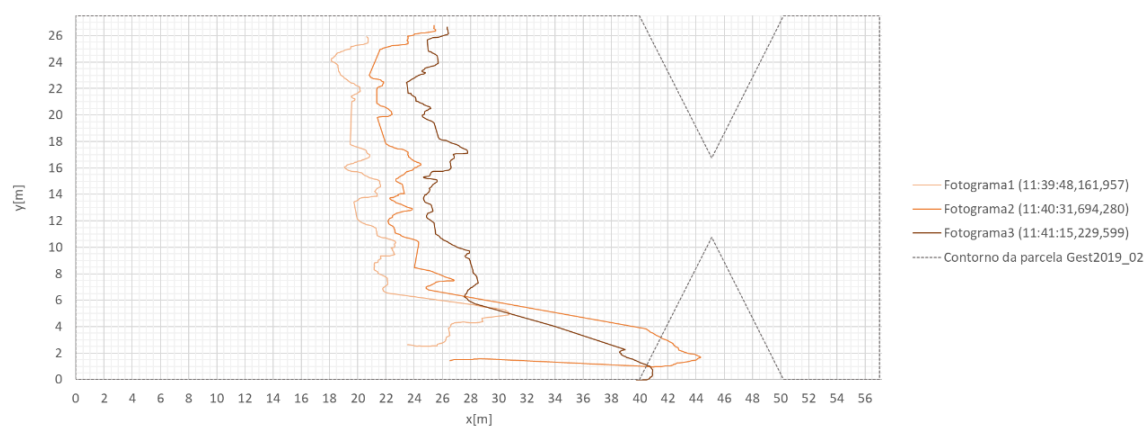


Figura E.2: Representação gráfica da frente de fogo nos instantes decorridos a $20mALG$, imagem de controlo, Gest2019_02

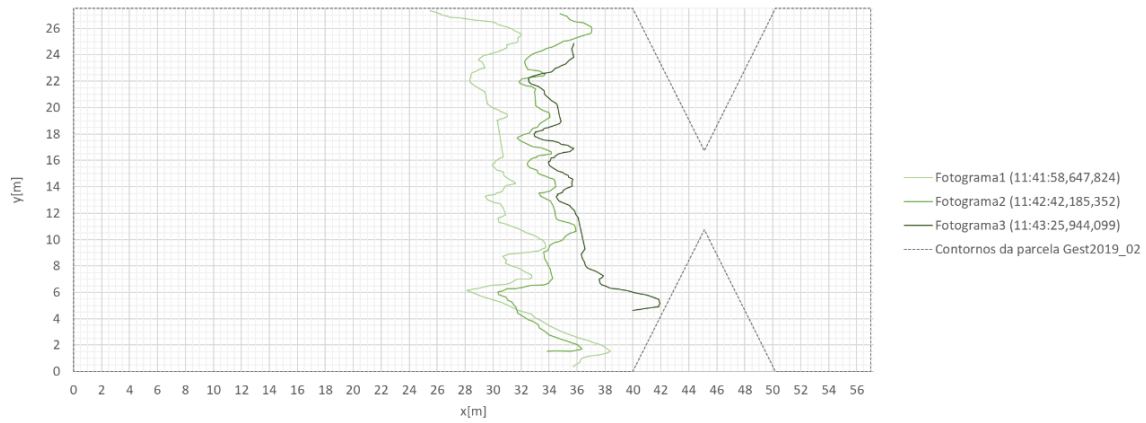


Figura E.3: Representação gráfica da frente de fogo nos instantes decorridos a $25mALG$, imagem de controlo, Gest2019_02

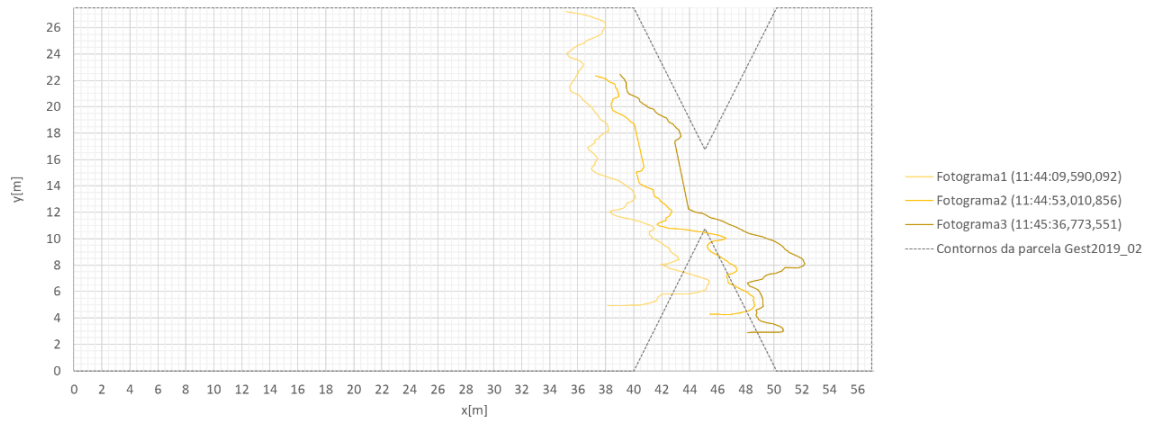


Figura E.4: Representação gráfica da frente de fogo nos instantes decorridos a $30mALG$, imagem de controlo, Gest2019_02

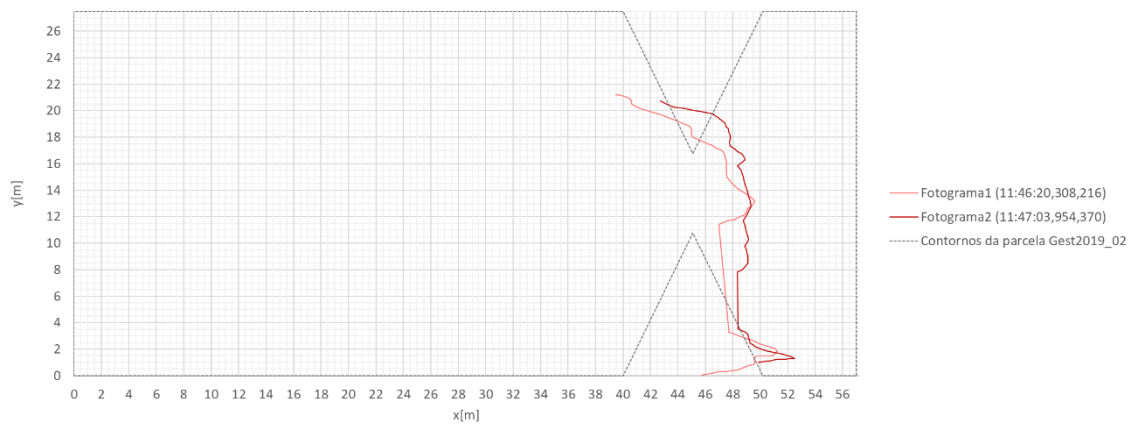


Figura E.5: Representação gráfica da frente de fogo nos instantes decorridos a $35mALG$, imagem de controlo, Gest2019_02

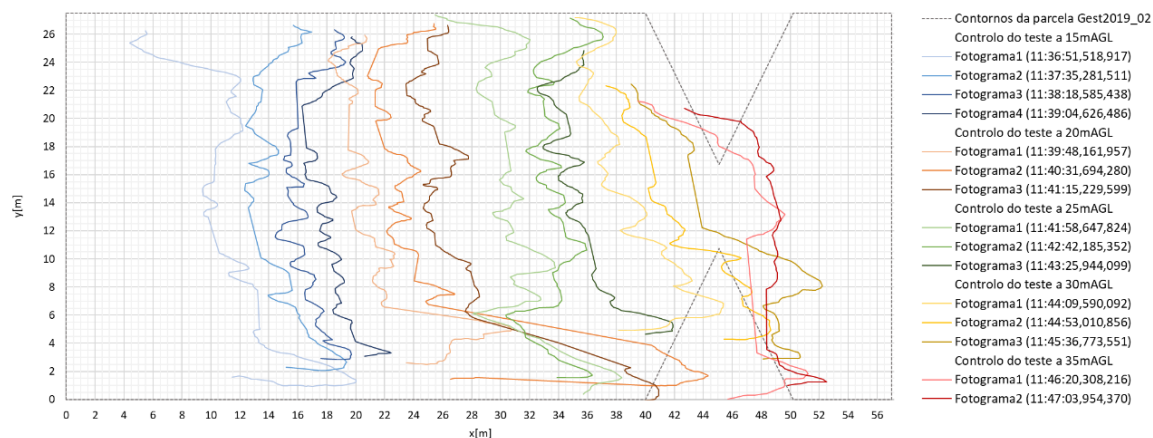


Figura E.6: Representação gráfica da frente de fogo nos instantes obtidos nos patamares de altitude realizados entre 15mALG e 35mAGL, imagem de controlo, Gest2019_02

ANEXO F – FRENTE DE FOGO REFERENCIADA GEOGRAFICAMENTE, GEST2019_02 - IMAGEM AÉREA

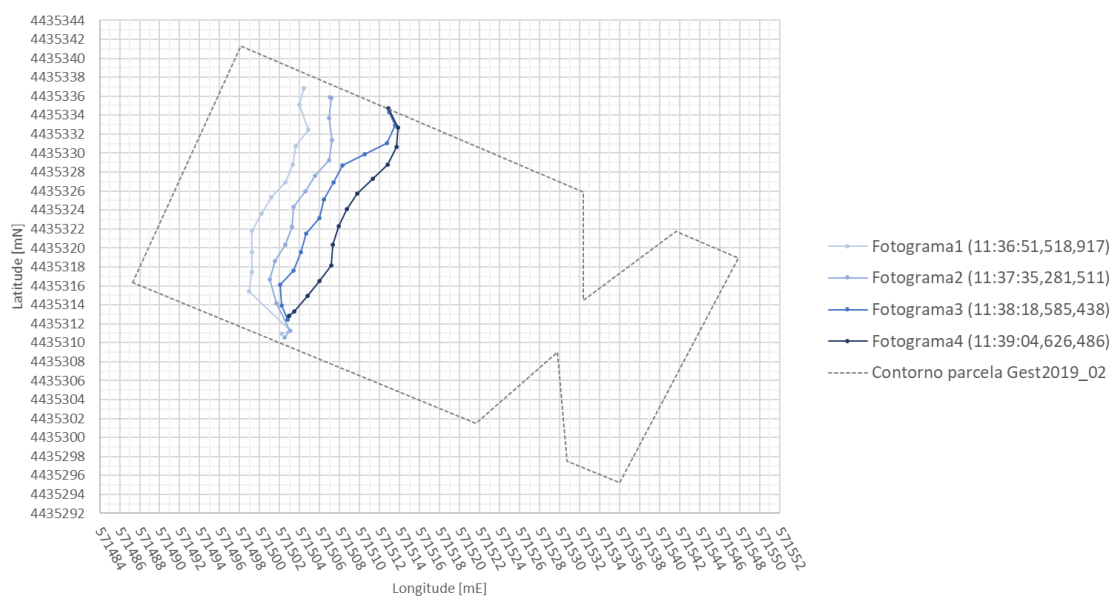


Figura F.1: Representação gráfica da frente de fogo referenciada geograficamente nos instantes decorridos a 15mALG, imagem aérea, Gest2019_02

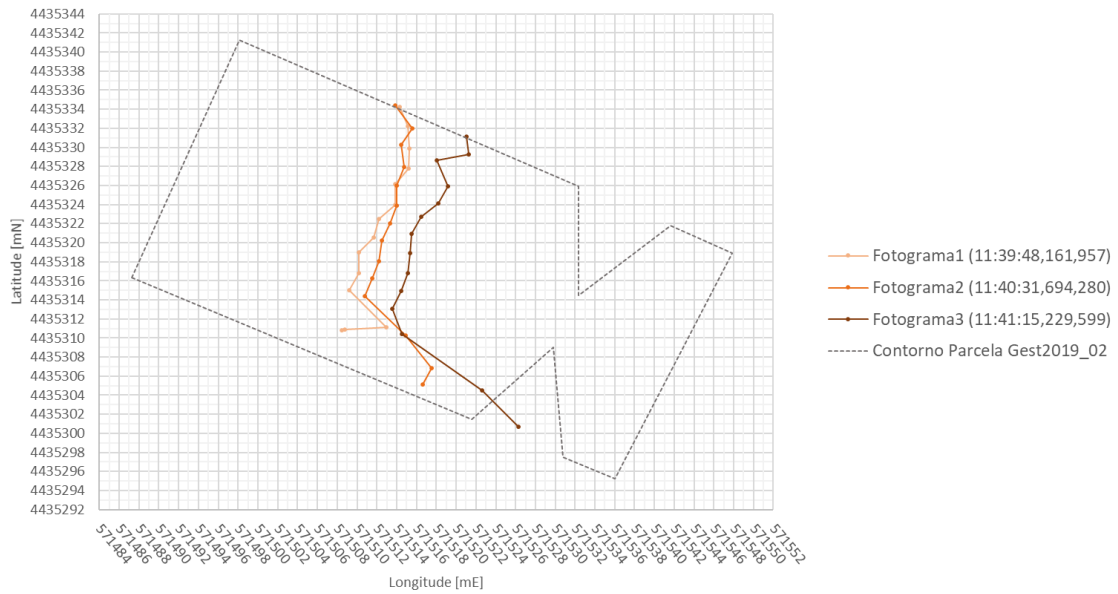


Figura F.2: Representação gráfica da frente de fogo referenciada geograficamente nos instantes decorridos a $20mALG$, imagem aérea, Gest2019_02

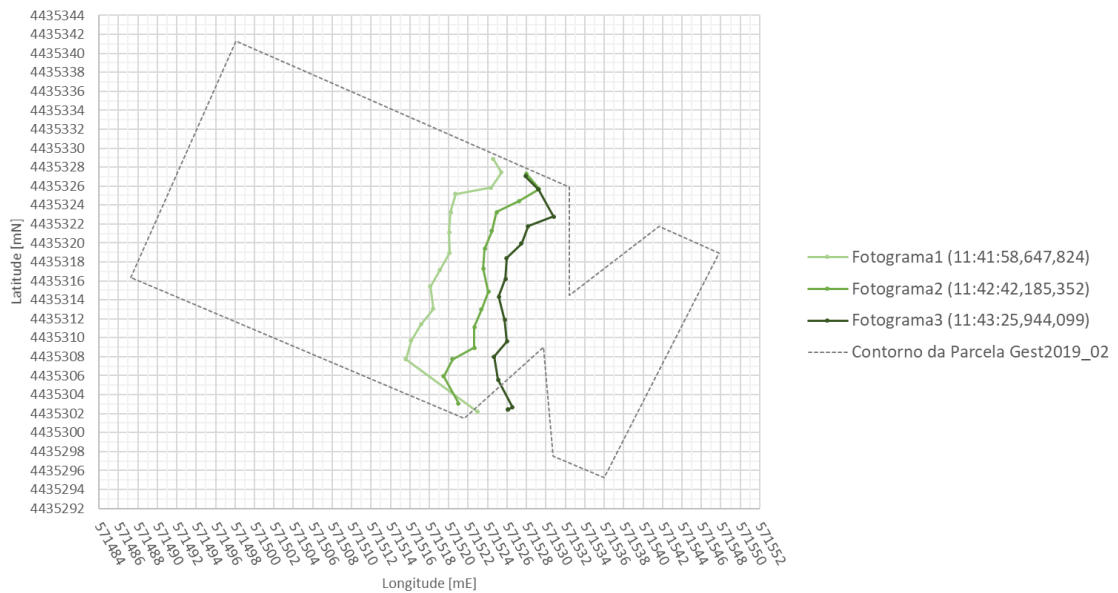


Figura F.3: Representação gráfica da frente de fogo referenciada geograficamente nos instantes decorridos a $25mALG$, imagem aérea, Gest2019_02

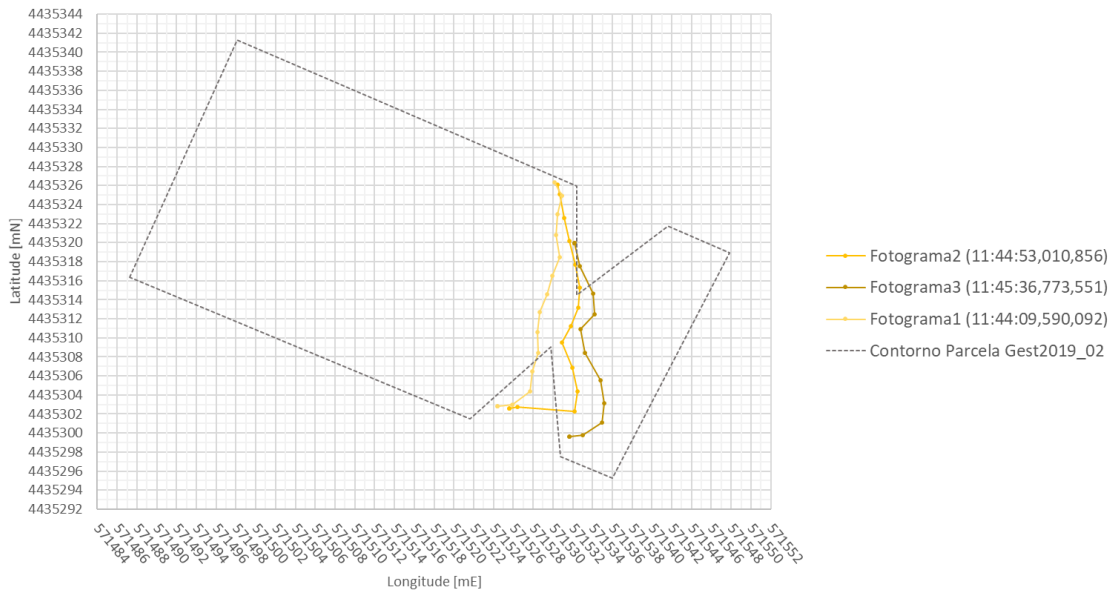


Figura F.4: Representação gráfica da frente de fogo referenciada geograficamente nos instantes decorridos a 30mALG, imagem aérea, Gest2019_02

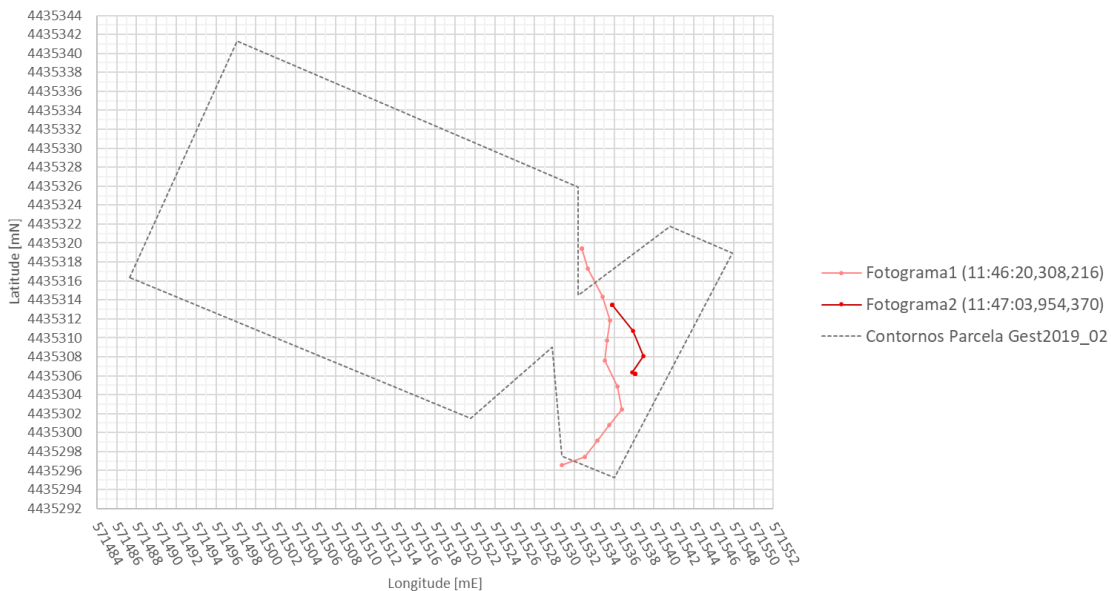


Figura F.5: Representação gráfica da frente de fogo referenciada geograficamente nos instantes decorridos a 35mALG, imagem aérea, Gest2019_02

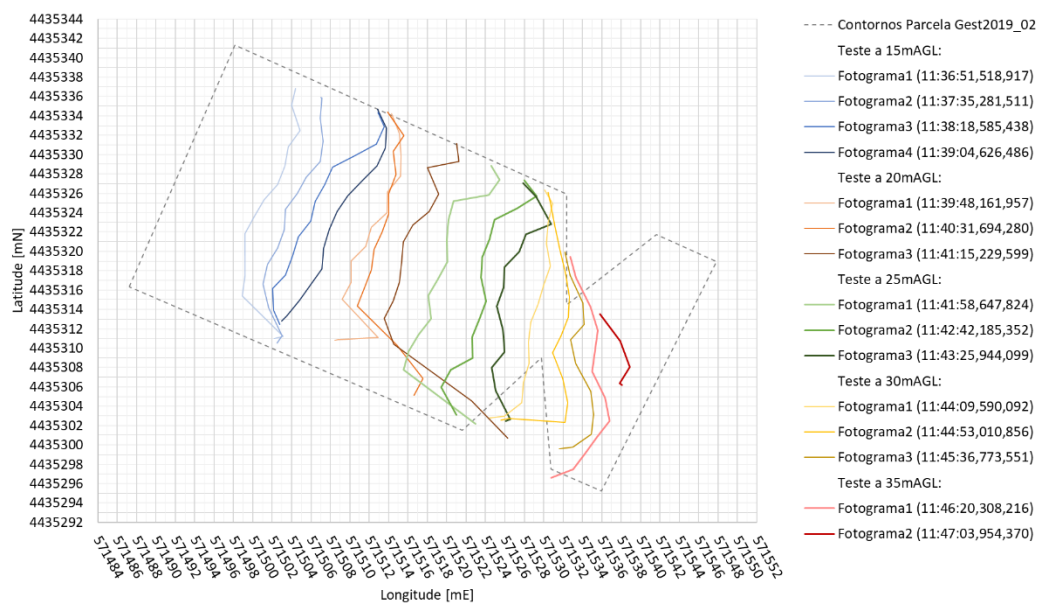


Figura F.6: Representação gráfica da frente de fogo, referenciada geograficamente, nos instantes obtidos nos patamares de altitude realizados entre 15mALG e 35mAGL, imagem de controlo, Gest2019_02

ANEXO G – FRENTE DE FOGO REFERENCIADA GEOGRAFICAMENTE, GEST2019_02 - IMAGEM DE CONTROLO

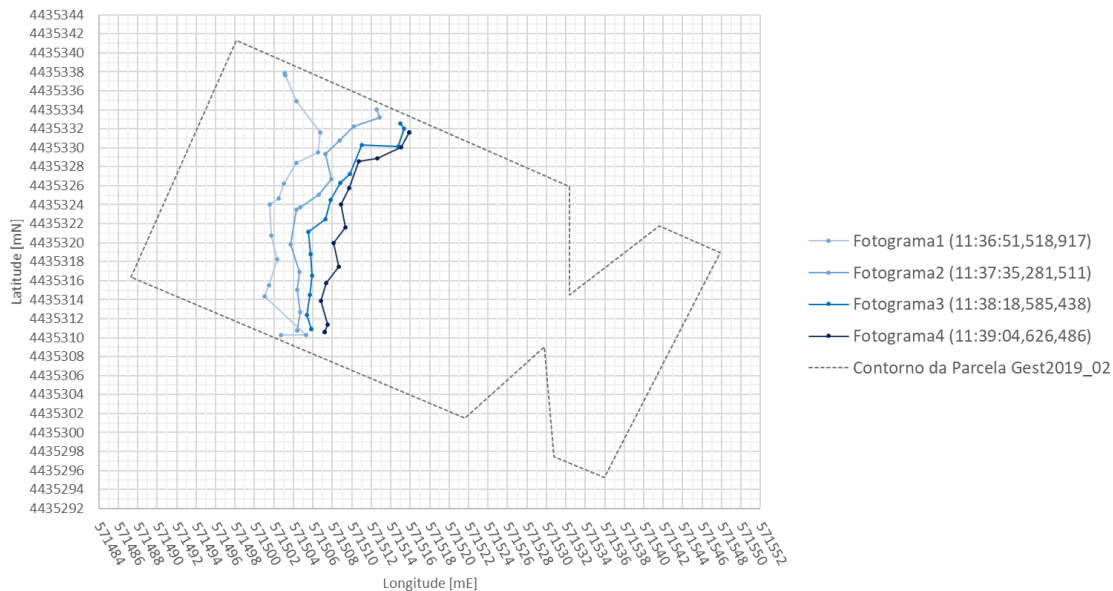


Figura G.1: Representação gráfica da frente de fogo referenciada geograficamente nos instantes decorridos a 15mALG, imagem aérea, Gest2019_02

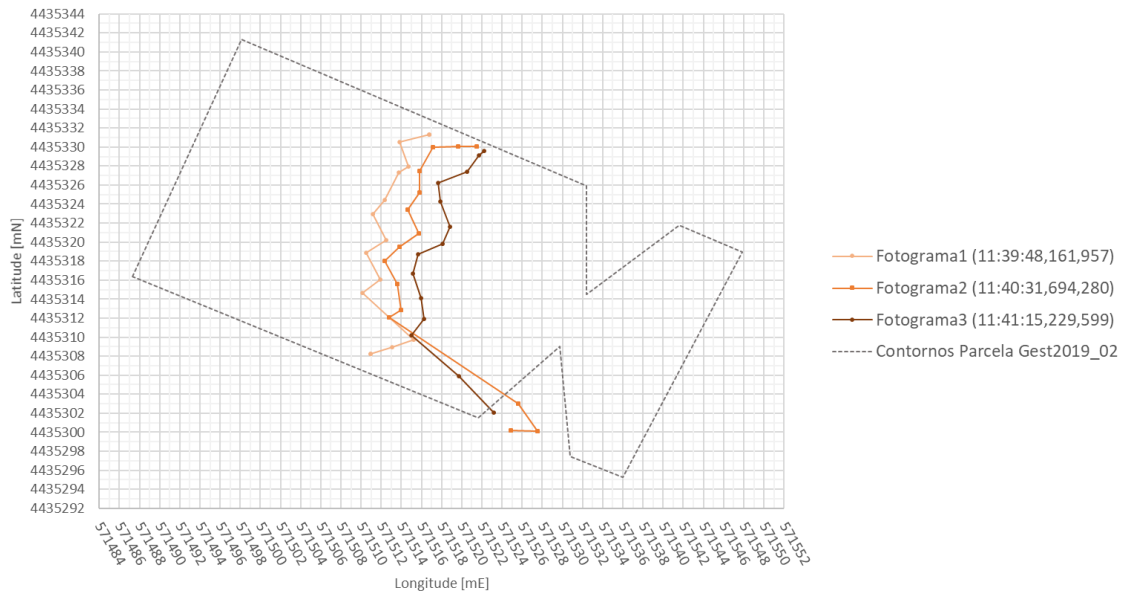


Figura G.2: Representação gráfica da frente de fogo referenciada geograficamente nos instantes decorridos a $20mALG$, imagem aérea, Gest2019_02

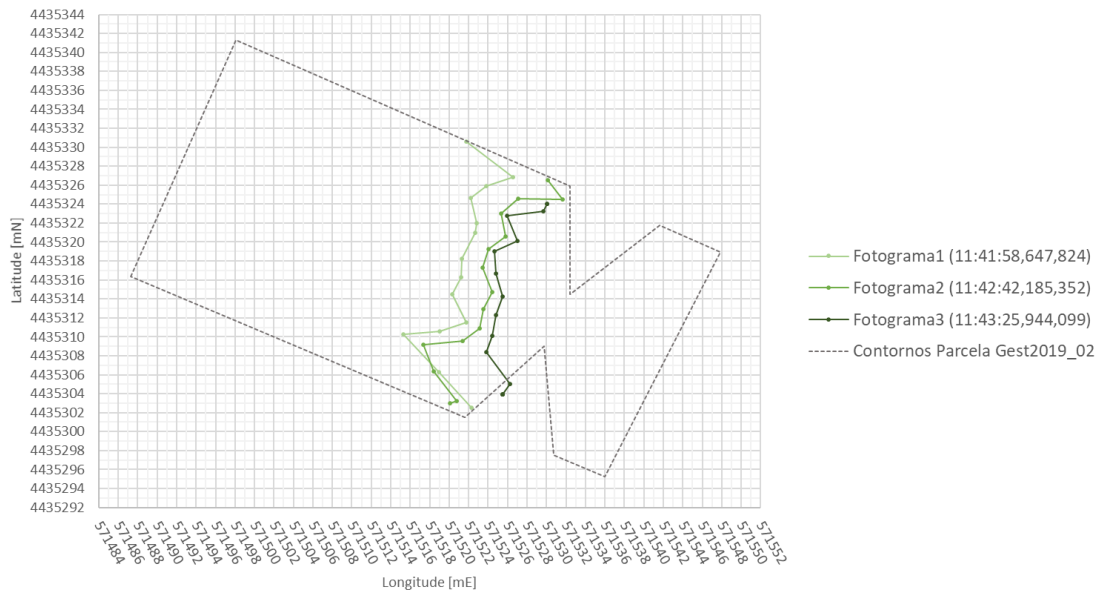


Figura G.3: Representação gráfica da frente de fogo referenciada geograficamente nos instantes decorridos a $25mALG$, imagem aérea, Gest2019_02

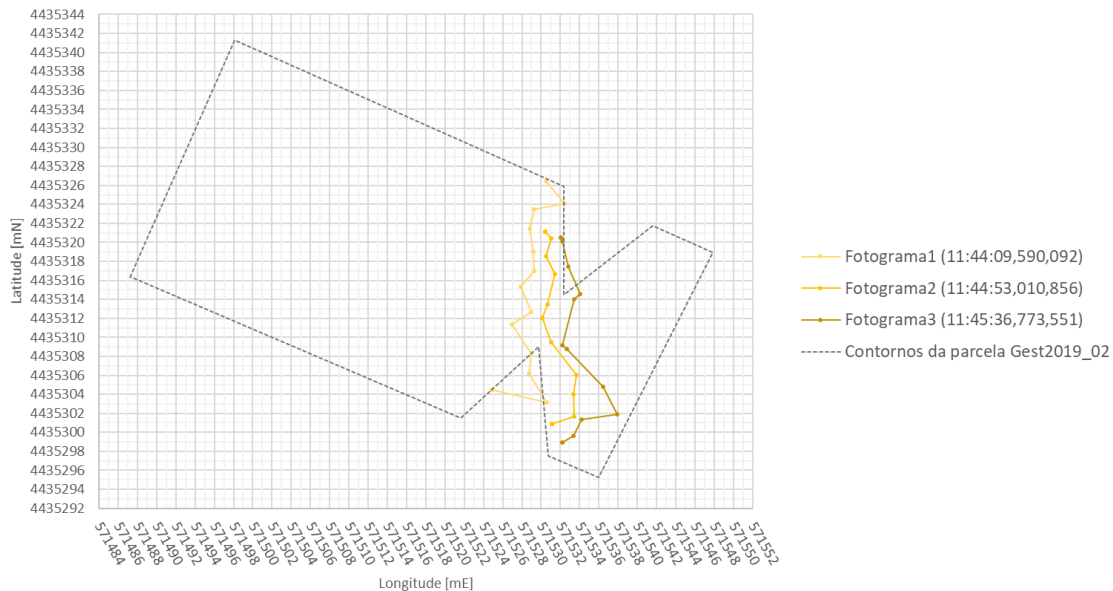


Figura G.4: Representação gráfica da frente de fogo referenciada geograficamente nos instantes decorridos a 30mALG, imagem aérea, Gest2019_02

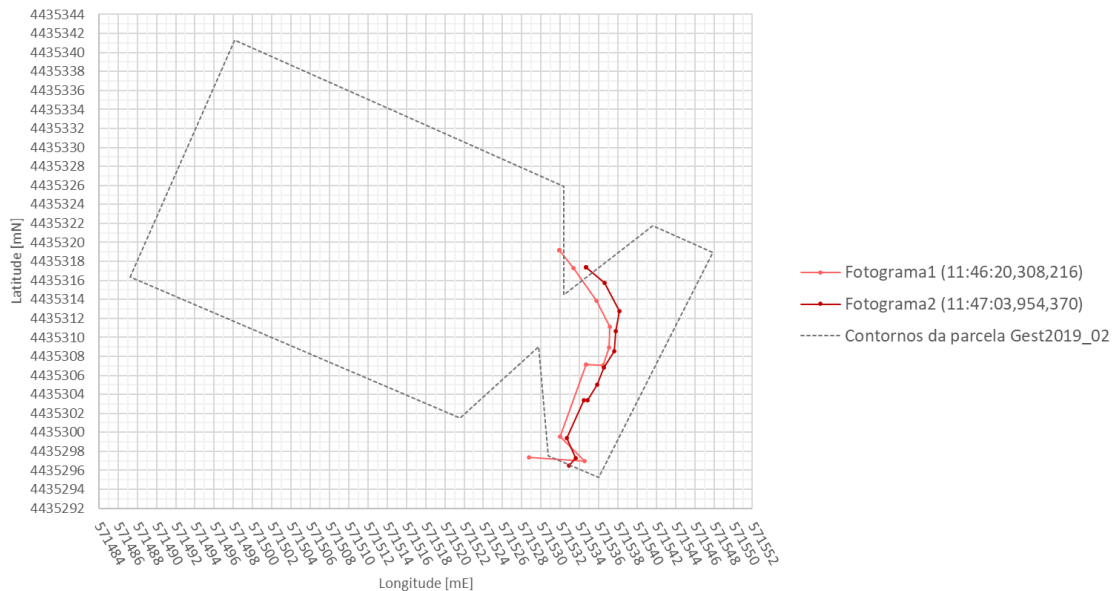


Figura G.5: Representação gráfica da frente de fogo referenciada geograficamente nos instantes decorridos a 35mALG, imagem aérea, Gest2019_02



Figura G.6: Representação gráfica da frente de fogo, referenciada geograficamente, nos instantes obtidos nos patamares de altitude realizados entre 15mALG e 35mAGL, imagem de controlo, Gest2019_02

ANEXO H – TABELAS DO CÁLCULO DA VELOCIDADE INSTANTÂNEA E INTENSIDADE DE PROPAGAÇÃO

Ordemada da parábola, y(m)	4			8			12			16			20			24								
	t(s)	Δt(s)	y _{aprox.} [m]	d[m]	Δd [m]	R[m/s]	I [mW/m²]	y _{aprox.} [m]	d[m]	Δd [m]	R[m/s]	I [mW/m²]	y _{aprox.} [m]	d[m]	Δd [m]	R[m/s]	I [mW/m²]	y _{aprox.} [m]	d[m]	Δd [m]	R[m/s]	I [mW/m²]		
15mAGL	2211.51	4.00	11.06	7.65	9.55	12.08	8.75	12.08	8.75	12.08	8.75	12.08	15.96	8.93	11.96	15.96	8.93	15.96	24.03	7.47	24.03	7.47	24.03	7.47
20mAGL	2255.28	4.00	14.03	8.07	12.06	10.68	4.92	14.03	12.06	10.68	4.92	14.03	15.96	10.70	13.96	15.96	10.70	15.96	24.03	10.70	24.03	10.70	24.03	10.70
25mAGL	2298.58	4.00	16.03	8.07	14.01	10.13	0.97	16.03	14.01	10.13	0.97	16.03	15.96	13.98	14.1	15.96	13.98	15.96	24.03	13.98	24.03	13.98	24.03	13.98
30mAGL	2341.62	4.00	18.03	8.07	16.03	1.43	0.01	18.03	16.03	1.43	0.01	18.03	15.96	17.93	3.37	15.96	17.93	15.96	24.03	17.93	24.03	17.93	24.03	17.93
35mAGL	2384.56	4.00	20.03	8.07	18.03	1.91	0.01	20.03	18.03	1.91	0.01	20.03	15.96	20.87	5.30	15.96	20.87	15.96	24.03	20.87	24.03	20.87	24.03	20.87
40mAGL	2427.22	4.00	22.03	8.07	20.03	2.39	0.01	22.03	20.03	2.39	0.01	22.03	15.96	22.82	7.24	15.96	22.82	15.96	24.03	22.82	24.03	22.82	24.03	22.82
45mAGL	2469.69	4.00	24.03	8.07	22.03	2.87	0.01	24.03	22.03	2.87	0.01	24.03	15.96	24.76	9.10	15.96	24.76	15.96	24.03	24.76	24.03	24.76	24.03	24.76
50mAGL	2511.91	4.00	26.03	8.07	24.03	3.35	0.01	26.03	24.03	3.35	0.01	26.03	15.96	26.70	10.96	15.96	26.70	15.96	24.03	26.70	24.03	26.70	24.03	26.70
55mAGL	2553.88	4.00	28.03	8.07	26.03	3.83	0.01	28.03	26.03	3.83	0.01	28.03	15.96	28.64	12.81	15.96	28.64	15.96	24.03	28.64	24.03	28.64	24.03	28.64
60mAGL	2595.61	4.00	30.03	8.07	28.03	4.31	0.01	30.03	28.03	4.31	0.01	30.03	15.96	30.58	14.66	15.96	30.58	15.96	24.03	30.58	24.03	30.58	24.03	30.58
65mAGL	2637.10	4.00	32.03	8.07	30.03	4.79	0.01	32.03	30.03	4.79	0.01	32.03	15.96	32.52	16.51	15.96	32.52	15.96	24.03	32.52	24.03	32.52	24.03	32.52
70mAGL	2678.31	4.00	34.03	8.07	32.03	5.27	0.01	34.03	32.03	5.27	0.01	34.03	15.96	34.46	18.36	15.96	34.46	15.96	24.03	34.46	24.03	34.46	24.03	34.46
75mAGL	2719.25	4.00	36.03	8.07	34.03	5.75	0.01	36.03	34.03	5.75	0.01	36.03	15.96	36.40	20.21	15.96	36.40	15.96	24.03	36.40	24.03	36.40	24.03	36.40

(a)

Ordemada da parábola, y(m)	4			8			12			16			20			24									
	t(s)	Δt(s)	y _{aprox.} [m]	d[m]	Δd [m]	R[m/s]	I [mW/m²]	y _{aprox.} [m]	d[m]	Δd [m]	R[m/s]	I [mW/m²]	y _{aprox.} [m]	d[m]	Δd [m]	R[m/s]	I [mW/m²]	y _{aprox.} [m]	d[m]	Δd [m]	R[m/s]	I [mW/m²]			
15mAGL	2211.51	3.96	13.40	8.00	12.97	9.82	12.97	8.00	12.97	9.82	12.97	9.82	15.96	10.23	12.04	15.96	10.23	15.96	24.00	7.84	24.00	7.84	24.00	7.84	
20mAGL	2255.28	3.96	15.37	8.00	14.94	13.64	12.56	15.37	14.94	13.64	12.56	15.37	10.23	14.02	12.84	15.96	14.02	15.96	24.00	14.24	6.40	24.00	14.24	24.00	14.24
25mAGL	2298.58	3.96	17.34	8.00	16.91	14.49	11.99	17.34	16.91	14.49	11.99	17.34	10.23	15.07	13.64	15.96	15.07	15.96	24.00	16.24	5.07	24.00	16.24	24.00	16.24
30mAGL	2341.62	3.96	19.31	8.00	18.88	15.34	10.34	19.31	18.88	15.34	10.34	19.31	10.23	16.07	13.24	15.96	16.07	15.96	24.00	18.24	3.68	24.00	18.24	24.00	18.24
35mAGL	2384.56	3.96	21.28	8.00	20.85	16.19	8.69	21.28	20.85	16.19	8.69	21.28	10.23	17.07	11.84	15.96	17.07	15.96	24.00	20.24	2.29	24.00	20.24	24.00	20.24
40mAGL	2427.22	3.96	23.25	8.00	22.82	17.04	7.04	23.25	22.82	17.04	7.04	23.25	10.23	18.07	10.44	15.96	18.07	15.96	24.00	22.24	0.85	24.00	22.24	24.00	22.24
45mAGL	2469.69	3.96	25.22	8.00	24.79	17.89	5.39	25.22	24.79	17.89	5.39	25.22	10.23	19.10	9.04	15.96	19.10	15.96	24.00	24.24	-0.74	24.00	24.24	24.00	24.24
50mAGL	2511.91	3.96	27.19	8.00	26.76	18.74	3.74	27.19	26.76	18.74	3.74	27.19	10.23	20.13	7.64	15.96	20.13	15.96	24.00	26.24	-2.34	24.00	26.24	24.00	26.24
55mAGL	2553.88	3.96	29.16	8.00	28.73	19.59	2.09	29.16	28.73	19.59	2.09	29.16	10.23	21.16	6.24	15.96	21.16	15.96	24.00	28.24	-3.94	24.00	28.24	24.00	28.24
60mAGL	2595.61	3.96	31.13	8.00	30.70	20.44	0.44	31.13	30.70	20.44	0.44	31.13	10.23	22.19	4.84	15.96	22.19	15.96	24.00	30.24	-5.54	24.00	30.24	24.00	30.24
65mAGL	2637.10	3.96	33.10	8.00	32.67	21.29	-0.21	33.10	32.67	21.29	-0.21	33.10	10.23	23.22	3.44	15.96	23.22	15.96	24.00	32.24	-7.14	24.00	32.24	24.00	32.24
70mAGL	2678.31	3.96	35.07	8.00	34.64	22.14	-0.91	35.07	34.64	22.14	-0.91	35.07	10.23	24.25	2.04	15.96	24.25	15.96	24.00	34.24	-8.74	24.00	34.24	24.00	34.24
75mAGL	2719.25	3.96	37.04	8.00	36.61	22.99	-1.61	37.04	36.61	22.99	-1.61	37.04	10.23	25.28	0.64	15.96	25.28	15.96	24.00	36.24	-10.34	24.00	36.24	24.00	36.24

(b)

Figura H.1: Tabelas usadas no cálculo da velocidade instantânea e intensidade de propagação para imagem aérea (a) e de controle (b)

ANEXO I – TABELAS DO CÁLCULO DA VELOCIDADE MÉDIA

Ordenada da parcela, y[m]			4			8			12			16			20			24		
Alt.	t[s]	Δt [s]	y aprox. [m]	x aprox. [m]	Δx [m]	y aprox. [m]	x aprox. [m]	Δx [m]	y aprox. [m]	x aprox. [m]	Δx [m]	y aprox. [m]	x aprox. [m]	Δx [m]	y aprox. [m]	x aprox. [m]	Δx [m]	y aprox. [m]	x aprox. [m]	Δx [m]
15mAGL	2211.51	-	4.00	11.06	-	7.95	9.55	-	12.04	8.75	-	16.01	9.54	-	19.96	8.93	-	24.03	7.47	-
	2255.28	43.77	4.04	14.03	2.98	8.07	12.06	2.51	12.04	12.14	3.39	16.00	11.75	2.21	19.98	12.57	3.64	24.03	10.70	3.22
	2298.58	87.07	4.01	14.61	3.56	7.85	14.18	4.63	11.97	13.72	4.97	16.00	13.82	4.27	20.00	13.98	5.05	24.03	17.09	9.62
	2344.62	133.11	3.99	16.05	4.99	7.99	16.95	7.40	12.02	16.60	7.85	16.02	16.32	6.77	20.01	17.35	8.42	24.03	18.08	10.61
R médio [m/s]			0.0227			0.0548			0.0500			0.0511			0.0537			0.0820		
20mAGL	2388.16	-	4.01	21.86	-	7.98	20.52	-	11.98	19.76	-	16.01	20.15	-	20.01	20.17	-	24.00	19.91	-
	2431.69	43.53	4.00	31.55	9.68	8.01	22.23	1.71	12.00	22.02	2.26	16.00	21.39	1.23	19.95	20.37	0.20	24.04	18.96	-0.96
	2475.22	87.06	3.98	37.09	15.23	8.00	25.31	4.79	12.02	25.20	5.45	15.97	23.80	3.65	19.99	24.91	4.74	24.00	22.89	2.98
	R médio [m/s]			0.1275			0.0708			0.0732			0.0555			0.1042			0.0905	
25mAGL	2518.64	-	4.00	29.36	-	7.96	29.27	-	12.00	28.46	-	16.05	28.81	-	20.01	27.09	-	24.09	29.83	-
	2562.18	43.54	3.96	33.65	4.29	8.05	35.29	6.02	11.98	34.27	5.81	16.00	32.63	3.83	19.96	31.77	4.68	24.02	33.02	3.18
	2605.94	87.3	3.96	41.48	12.11	8.00	37.50	8.23	11.99	36.92	8.46	15.97	35.18	6.37	20.04	35.10	8.01	24.01	36.94	7.10
	R médio [m/s]			0.1788			0.0505			0.0605			0.0582			0.0761			0.0896	
30mAGL	2649.59	-	3.98	40.76	-	7.98	41.13	-	11.96	39.85	-	15.93	39.11	-	20.01	38.63	-	24.02	36.59	-
	2693.01	43.42	3.97	41.32	0.57	7.94	46.18	5.06	12.03	42.60	2.75	15.99	42.55	3.44	20.01	40.39	1.76	24.02	37.35	0.76
	2736.77	87.18	4.02	48.52	7.76	7.98	49.08	7.96	11.98	45.17	5.32	16.01	44.33	5.22	20.04	40.88	2.25	21.99	39.41	2.82
	R médio [m/s]			0.1644			0.0663			0.0588			0.0408			0.0112			0.0470	
35mAGL	2780.31	-	4.02	49.98	-	8.03	50.86	-	11.97	47.11	-	16.05	45.86	-	20.03	41.54	-	21.74	40.10	-
	2823.95	43.64	11.95	50.47	0.50	11.95	50.47	-0.39	12.01	50.18	3.07	16.00	48.45	2.59	17.64	45.38	3.84	17.64	45.38	5.28
	R médio [m/s]			-			-			-			-			-			-	
R médio por ordenada da parcela [m/s]			0.1233			0.0606			0.0606			0.0514			0.0613			0.0773		

(a)

Ordenada da parcela, y[m]			4			8			12			16			20			24		
Alt.	t[s]	Δt [s]	y aprox. [m]	x aprox. [m]	Δx [m]	y aprox. [m]	x aprox. [m]	Δx [m]	y aprox. [m]	x aprox. [m]	Δx [m]	y aprox. [m]	x aprox. [m]	Δx [m]	y aprox. [m]	x aprox. [m]	Δx [m]	y aprox. [m]	x aprox. [m]	Δx [m]
15m	2211.51	-	3.96	13.40	-	8.01	12.97	-	12.97	9.82	-	15.55	10.23	-	20.00	12.04	-	24.00	7.84	-
	2255.28	43.77	3.99	17.37	3.97	7.78	15.61	2.64	13.64	12.56	2.74	16.03	14.02	3.78	20.18	12.84	0.80	24.01	14.24	6.40
	2298.58	87.07	3.95	18.17	4.77	7.96	16.91	3.94	11.99	14.69	4.86	16.01	15.37	5.13	19.31	16.04	4.00	23.98	19.30	11.47
	2344.62	133.11	3.95	20.50	7.10	7.87	18.57	5.59	11.98	17.52	7.70	16.04	16.50	6.26	20.88	16.30	4.26	24.02	19.60	11.77
R médio [m/s]			0.0351			0.0331			0.0556			0.0277			0.0384			0.0595		
20m	2388.16	-	4.05	26.58	-	7.99	21.55	-	11.98	20.15	-	15.97	19.07	-	21.01	19.56	-	24.00	18.29	-
	2431.69	43.53	3.85	40.43	13.85	7.98	25.75	4.20	11.96	22.15	2.00	16.01	24.08	5.01	19.96	22.31	2.75	24.85	21.53	3.24
	2475.22	87.06	4.05	33.93	7.35	8.08	28.21	6.66	11.96	25.28	5.13	15.99	26.63	7.56	20.00	24.58	5.02	23.90	25.73	7.44
	R médio [m/s]			-0.1494			0.0565			0.0717			0.0586			0.0523			0.0965	
25m	2518.64	-	4.05	33.02	-	8.02	31.28	-	12.07	30.85	-	15.96	30.21	-	19.96	30.00	-	23.94	29.32	-
	2562.18	43.54	3.93	32.56	-0.46	8.08	33.91	2.62	11.98	34.43	3.58	15.91	32.54	2.33	19.93	33.34	3.35	24.05	32.81	3.49
	2605.94	87.3	4.65	39.98	6.96	8.03	36.61	5.32	11.95	35.88	5.03	15.95	34.07	3.86	19.97	34.62	4.63	23.98	35.73	6.41
	R médio [m/s]			0.1696			0.0616			0.0333			0.0349			0.0293			0.0667	
30m	2649.59	-	4.91	39.18	-	8.08	41.95	-	12.03	38.25	-	15.98	37.38	-	19.91	37.05	-	23.97	35.25	-
	2693.01	43.42	4.25	46.35	7.16	8.03	47.10	5.15	12.05	42.73	4.48	15.45	40.73	3.35	20.03	38.42	1.37	22.33	37.29	2.04
	2736.77	87.18	3.99	48.89	9.70	7.94	52.10	10.15	12.02	44.45	6.20	17.14	42.96	5.58	19.98	41.00	3.95	22.46	39.02	3.77
	R médio [m/s]			0.0580			0.1142			0.0393			0.0510			0.0590			0.0395	
35m	2780.31	-	3.34	47.70	-	11.41	46.98	-	12.05	48.65	-	16.04	47.58	-	20.07	41.57	-	21.24	39.48	-
	2823.95	43.64	3.55	48.37	0.67	8.01	48.68	1.71	11.87	48.83	0.17	15.85	48.33	0.75	20.00	45.22	3.65	20.73	42.71	3.23
	R médio [m/s]			-			-			-			-			-			-	
R médio por ordenada da parcela [m/s]			0.0284			0.0664			0.0500			0.0430			0.0447			0.0655		

(b)

Figura I.1: Tabelas usadas no cálculo da velocidade média para a imagem aérea (a) e de controlo (b)

ANEXO J – TABELA DO CÁLCULO DO DESVIO

Altitude [m]	ordenada da parcela:	4	8	12	16	20	24		12	16
15	v média, aérea [m/s]	0.023	0.055	0.050	0.051	0.054	0.082		0.050	0.051
	v média, controlo [m/s]	0.035	0.033	0.056	0.028	0.038	0.059		0.056	0.028
	valor residual $r_i = y_i - \hat{y}_i$	-0.012	0.022	-0.006	0.023	0.015	0.023		-0.006	0.023
	desvio dos valores residuais $rms = \sqrt{\frac{\sum r_i^2}{n}}$	0.020							0.024	
20	v média, aérea [m/s]	0.127	0.071	0.073	0.056	0.104	0.090		0.073	0.056
	v média, controlo [m/s]	-0.149	0.056	0.072	0.059	0.052	0.096		0.072	0.059
	valor residual $r_i = y_i - \hat{y}_i$	0.277	0.014	0.001	-0.003	0.052	-0.006		0.001	-0.003
	desvio dos valores residuais $rms = \sqrt{\frac{\sum r_i^2}{n}}$	0.126							0.003	
25	v média, aérea [m/s]	0.179	0.050	0.061	0.058	0.076	0.090		0.061	0.058
	v média, controlo [m/s]	0.170	0.062	0.033	0.035	0.029	0.067		0.033	0.035
	valor residual $r_i = y_i - \hat{y}_i$	0.009	-0.011	0.027	0.023	0.047	0.023		0.027	0.023
	desvio dos valores residuais $rms = \sqrt{\frac{\sum r_i^2}{n}}$	0.029							0.036	
30	v média, aérea [m/s]	0.164	0.066	0.059	0.041	0.011	0.047		0.059	0.041
	v média, controlo [m/s]	0.058	0.114	0.039	0.051	0.059	0.040		0.039	0.051
	valor residual $r_i = y_i - \hat{y}_i$	0.106	-0.048	0.020	-0.010	-0.048	0.007		0.020	-0.010
	desvio dos valores residuais $rms = \sqrt{\frac{\sum r_i^2}{n}}$	0.057							0.022	
35	v média, aérea [m/s]	-	-	-	-	-	-		-	-
	v média, controlo [m/s]	-	-	-	-	-	-		-	-
	valor residual $r_i = y_i - \hat{y}_i$									
	desvio dos valores residuais $rms = \sqrt{\frac{\sum r_i^2}{n}}$	-							-	
[15m, 35m]	v média, aérea [m/s]	0.123	0.061	0.061	0.051	0.061	0.077		0.061	0.051
	v média, controlo [m/s]	0.028	0.066	0.050	0.043	0.045	0.066		0.050	0.043
	valor residual $r_i = y_i - \hat{y}_i$	0.095	-0.006	0.011	0.008	0.017	0.012		0.011	0.008
	desvio dos valores residuais $rms = \sqrt{\frac{\sum r_i^2}{n}}$	0.044							0.01353	

Figura J.1: Tabela usada no cálculo do desvio RMS

ANEXO L – DIMENSÕES DAS PARCELAS GEST2019_01 E GEST2019_02

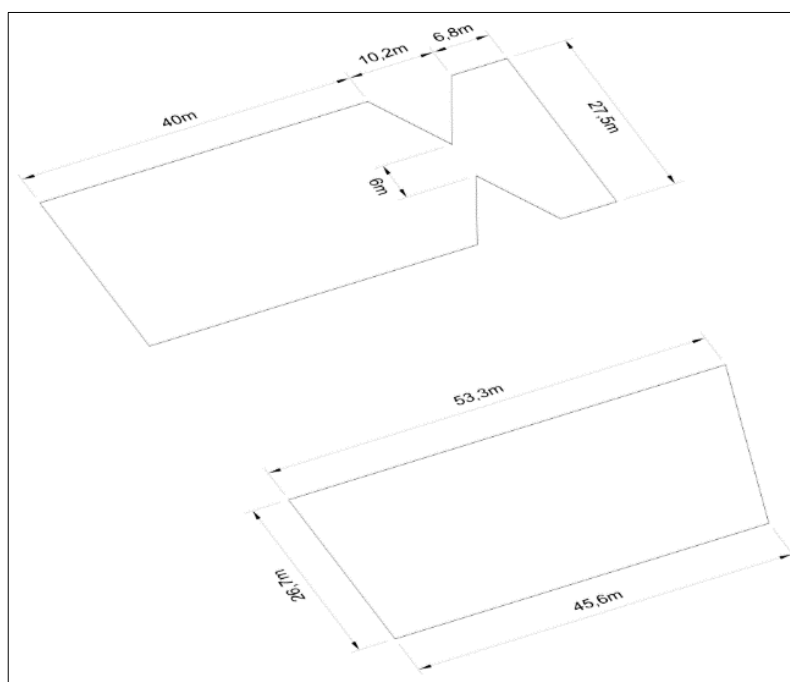


Figura L.1: Detalhe das dimensões das parcelas Gest2019_01 e Gest2019_02, necessárias para o processo de localização da frente de fogo aquando do processamento com o software MicroStation 95