Rede primária de faixas de gestão de combustível: análise espacial à eficácia na contenção de incêndios rurais em Portugal

João Carlos Hermenegildo Oliveira

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciência e Sistemas de Informação Geográfica

NOVA Information Management School

Rede primária de faixas de gestão de combustível: análise espacial à eficácia na contenção de incêndios rurais em Portugal

Tese orientada por

Professor Doutor Marco Octávio Trindade Painho

E coorientada por

Doutor Akli Ait Benali

DECLARAÇÃO DE ORIGINALIDADE

Declaro que o trabalho contido neste documento é da minha autoria e não de outra pessoa. Toda a assistência recebida de outras pessoas está devidamente assinalada e é efetuada referência a todas as fontes utilizadas (publicadas ou não).

O trabalho não foi anteriormente submetido ou avaliado na NOVA Information Management School ou em qualquer outra instituição.

AGRADECIMENTOS

A todos os que se têm cruzado comigo nesta caminhada.

Ao Dr. Akli Benali, pela disponibilidade e empenho no acompanhamento deste trabalho desde o primeiro contacto.

Aos Bombeiros Voluntários do Bombarral na figura de cada um dos meus camaradas.

À minha família e em particular aos meus pais e ao meu irmão, por tudo.

À Maria, pela partilha e companhia na jornada da vida.

Rede primária de faixas de gestão de combustível: análise espacial à eficácia na contenção de incêndios rurais em Portugal

RESUMO

A tendência do potencial destrutivo dos incêndios rurais é visivelmente crescente, resultado da alteração de padrões climáticos, do abandono rural e da desvalorização da economia florestal. Neste sentido, é inevitável desenvolverem-se esforços que aumentem a resiliência do espaço rural a estes desastres, ambicionando acima de tudo a proteção das pessoas e dos seus bens. Neste trabalho perspetiva-se acerca da funcionalidade da rede primária de faixas de gestão de combustível (RPFGC) através do desenvolvimento de um método de avaliação da sua eficácia na contenção de incêndios rurais.

Para derivar esta análise selecionaram-se sete incêndios rurais ocorridos entre 2020 e 2023, onde se verificou interseção entre o fogo e troços de RPFGC. A partir do método desenvolvido derivou-se um conjunto de dados composto por 1 665 interseções, onde automaticamente se classificou a eficácia do troço de RPFGC na contenção do incêndio (eficaz/não eficaz). Cada interseção foi posteriormente caracterizada segundo 11 variáveis independentes (descritoras do comportamento do fogo, meteorologia, relevo, entre outras) com o intuito de treinar um conjunto de classificadores automáticos, os quais viriam a servir para determinar os fatores com maior influência na eficácia da RPFGC.

Os principais resultados indicam que i) a RPFGC contribuiu para a contenção do perímetro do incêndio em 19% das interseções identificadas; ii) o modelo de classificação automática com melhor desempenho foi treinado pelo algoritmo *random forest,* devolvendo uma exatidão de 92%; e iii) as variáveis que mais influenciam a eficácia da RPFGC na contenção de um incêndio relacionam-se com o comportamento estimado do fogo. Este trabalho assume-se como um ponto de partida para a avaliação de um elemento estruturante da paisagem, contribuindo para o desenho, planeamento e implementação de medidas de prevenção mais eficazes contra incêndios rurais.

Fuel break primary network: spatial analysis of the effectiveness in containment of wildfires in Portugal

ABSTRACT

The trend in the destructive potential of wildfires is visibly increasing, as a result of changing climate patterns, rural abandonment and the devaluation of the forest economy. In this sense, it is inevitable to develop efforts to enhance the resilience of rural areas to these disasters, aiming above all to protect people and their property. This work focuses on the functionality of the fuel break primary network (FBPN) by developing a method for evaluating its effectiveness in containing wildfires.

To conduct this analysis, seven wildfires that occurred between 2020 and 2023 were selected, where an intersection between the fire and segments of the FBPN was observed. From the developed method, a dataset of 1,665 intersections was generated, where the effectiveness of the FBPN segment in containing the fire was automatically classified (effective/not effective). Each intersection was subsequently characterized according to 11 independent variables (descriptors of fire behavior, meteorology, terrain, among others) in order to train a set of automatic classifiers, which would then serve to determine the factors with the greatest influence on the effectiveness of the FBPN.

The main results indicate that i) the FBPN contributed to containing the fire perimeter in 19% of the identified intersections; ii) the best-performing automatic classification model was trained by the random forest algorithm, achieving an accuracy of 92%; and iii) the variables that most influence the FBPN's effectiveness in containing a fire are related to the estimated fire behavior. This work provides a starting point for evaluating a structural landscape element, contributing to the design, planning and implementation of more effective prevention measures against wildfires.

PALAVRAS-CHAVE

Sistemas de Informação Geográfica

Incêndios rurais

Faixas de gestão de combustível

Eficácia

Comportamento do fogo

KEYWORDS

Geographic Information Systems

Wildfires

Fuel breaks

Effectiveness

Fire behaviour

ACRÓMIMOS

AGIF	Agência para a Gestão Integrada de Fogos Rurais, I.P.
ANEPC	Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil
BUI	Buildup Index
CRGIFR	Comissão Regional de Gestão Integrada de Fogos Rurais
CSGIFR	Comissão Sub-Regional de Gestão Integrada de Fogos Rurais
CTI	Comissão Técnica Independente
CWFIS	Canadian Wildland Fire Information System
DC	Drought Code
DMC	Duff Moisture Code
EFFIS	European Forest Fire Information System
FFMC	Fine Fuel Moisture Code
FIC	faixa de interrupção de combustível
FRC	faixa de redução de combustível
FWI	Fire Weather Index
GNR	Guarda Nacional Republicana
ICNF	Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas, I.P.
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera, I.P.
ISI	Initial Spread Index
KNN	K Nearest Neighbor
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
PDDFCI	Plano Distrital de Defesa da Floresta Contra Incêndios
PMDFCI	Plano Municipal de Defesa da Floresta Contra Incêndios
PME	Programa Municipal de Execução
PNDFCI	Plano Nacional de Defesa da Floresta Contra Incêndios
PNGIFR	Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais
PNPOT	Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território
PRA	Plano Regional de Ação
PRR	Plano de Recuperação e Resiliência
PSA	Plano Sub-Regional de Ação
RF	Random Forest
RPFGC	Rede Primária de Faixas de Gestão de Combustível
SGIFR	Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SVM	Support Vector Machine

ÍNDICE DO TEXTO

DECLARAÇÃO DE ORIGINALIDADE iii

AGRADECIMENTOS iv

RESUMO v

ABSTRACT vi

PALAVRAS-CHAVE vii

KEYWORDS vii

ACRÓNIMOS viii

ÍNDICE DE TABELAS xi

ÍNDICE DE FIGURAS xii

1 INTRODUÇÃO 1

1.1 Incêndios rurais em Portugal 2

1.2 Enquadramento legal 3

1.3 Prevenção e combate 5

1.4 Rede primária de faixas de gestão de combustível 7

1.5 Objetivo 10

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 11

2.1 Definição da estratégia de pesquisa e dos critérios sistemáticos 11

2.2 Métodos de avaliação de eficácia de faixas de gestão de combustível 13

3 METODOLOGIA 17

3.1 Recolha de dados 19

3.2 Identificação dos casos de estudo 22

3.2.1 Enquadramento geográfico dos casos de estudo selecionados 24

3.2.2 Validação dos potenciais casos de estudo 26

3.3 Caracterização das interseções entre o fogo e a RPFGC 28

3.3.1 Progressões de incêndio 29

3.3.2 Automatização da identificação e caracterização das interseções 30

3.3.3 Modelação do trajeto provável do fogo 31

3.3.4 Interseção entre o trajeto provável do fogo e os troços da RPFGC 34

3.3.5 Eficácia verificada da RPFGC na contenção do incêndio 36

3.3.6 Caracterização das interseções 38

3.4 Avaliação da eficácia da RPFGC 49

3.4.1 Desenvolvimento da análise exploratória 50

3.4.2 Desenvolvimento dos modelos de classificação automática da eficácia da RPFGC 51

4 RESULTADOS 54

4.1 Análise exploratória 55
4.1.1 Velocidade de propagação 55
4.1.2 Intensidade da frente de chamas 57
4.1.3 Direção de propagação 58
4.1.4 Diferença em relação à direção de propagação 60
4.1.5 Ângulo de entrada do fogo na RPFGC 62
4.1.6 Idade da intervenção na RPFGC 64
4.1.7 Declive 65
4.1.8 Exposição 66

4.2 Classificação automática da eficácia da RPFGC 68
4.2.1 Comparação dos modelos de classificação automática 68
4.2.2 Importância das variáveis 70

5 DISCUSSÃO 71

5.1 Eficácia observada e eficácia modelada 71

5.2 Limitações 73

5.3 Contribuições, implicações práticas e desenvolvimentos futuros 76

6 CONCLUSÕES 77

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 78

8 ANEXOS 82

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Conjuntos de dados utilizados e as principais características 22
Tabela 2 – Casos de estudo selecionados para desenvolvimento da análise de eficácia da RPFGC 27
Tabela 3 – Variáveis independentes consideradas na modelação da eficácia da RPFGC 39
Tabela 4 – Comparação de métricas de avaliação do desempenho dos modelos de classificação automática implementados 69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Comparação da área ardida face à área total em Portugal, Espanha, França, Itália e Grécia (EFFIS, 2024) 2
Figura 2 – Balanço de despesa orçamental entre as ações de prevenção e combate para o período 2017 – 2022 (AGIF, 2023) 6
Figura 3 – Secção transversal do modelo de RPFGC, adaptado (ICNF, 2014) 9
Figura 4 – Fluxograma da revisão com critérios sistemáticos 12
Figura 5 – Fluxograma do método proposto para análise de eficácia da RPFGC 17
Figura 6 – Processo de análise espacial da interseção de RPFGC com incêndio para deteção de potenciais casos de estudo 23
Figura 7 – Mapa de enquadramento dos casos de estudo selecionados 24
Figura 8 – Progressão de incêndio na forma de a) mapa e b) grafo 30
Figura 9 – Processo de determinação do trajeto provável do fogo 33
Figura 10 – Mapa de identificação de interseções entre o trajeto provável do fogo e o troço de RPFGC 36
Figura 11 – Mapa de verificação da eficácia nas interseções entre o fogo e o troço de RPFGC 38
Figura 12 – Mapa da velocidade de propagação estimada em cada interseção entre o fogo e o troço de RPFGC 41
Figura 13 – Mapa da intensidade da frente de chamas estimada em cada interseção entre o fogo e o troço de RPFGC 43
Figura 14 – Distância percorrida pelo fogo no interior de um troço de RPFGC em função do ângulo de entrada do trajeto estimado do fogo 45
Figura 15 – Mapa do declive em cada interseção entre o fogo e o troço de RPFGC 46
Figura 16 – Mapa da exposição solar da vertente em cada interseção entre o fogo e o troço de RPFGC 48
Figura 17 – Percentagem de interseções identificadas e percentagem de interseções com eficácia por caso de estudo 55
Figura 18 – Distribuição da velocidade de propagação estimada nas interseções, por caso de estudo e por eficácia verificada 56
Figura 19 – Comparação da intensidade da frente de chamas estimada nas interseções e a múltiplas distâncias 57
Figura 20 – Distribuição da direção de propagação das interseções, por caso de estudo e por eficácia verificada 59
Figura 21 – Distribuição da diferença em relação à direção de propagação das interseções, por caso de estudo e por eficácia verificada 61
Figura 22 – Distribuição do ângulo de entrada do fogo na RPFGC das interseções, por caso de estudo e por eficácia verificada 63
Figura 23 – Interseções por idade da intervenção na RPFGC, com diferenciação pela eficácia verificada 64
Figura 24 – Distribuição do declive das interseções, por caso de estudo e por eficácia verficada 66
Figura 25 – Distribuição da exposição das interseções, por caso de estudo e por eficácia verificada 67
Figura 26 – Matrizes de confusão dos modelos de classificação automática implementados 68
Figura 27 – Importância relativa das variáveis independentes no modelo treinado pelo algoritmo random forest 71

1 INTRODUÇÃO

O fogo, na sua dependência equilateral de combustível, comburente e energia de ativação, compreende-se como um fenómeno físico-químico essencial à sobrevivência e evolução humana. O momento de fundação da Humanidade é confundido com o momento em que a espécie humana integra o uso do fogo nas suas rotinas, obtendo o fogo nesta instância também um significado social e cultural (Alperson-Afil & Goren-Inbar, 2010).

Contudo nem só o fogo controlado no tempo e no espaço integra as rotinas do Homem. Ao evento onde ocorre a libertação simultânea de energia, luz e chama, gerada pela combustão de material inflamável sem controlo no espaço dá-se o nome de incêndio (Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais 20-30, 2022). Estes caracterizam-se por gerar múltiplos impactos, dos quais o mais gravoso é indubitavelmente a perda de vida humana. A par desta consequência irreversível destaca-se de igual forma a destruição de património natural e edificado e todas as mutações sociais e económicas que daí poderão advir.

O facto de que os incêndios em espaço natural ocorrem desde sempre é inquestionável: assume-se que esta tipologia de combustão não controlada é parte integrante da dinâmica que se estabelece em vários ecossistemas, havendo os mesmos ao longo do tempo desenvolvido mecanismos evolutivos para recuperar após as transformações perpetradas por um evento desta natureza (Buma & Wessman, 2013). Neste sentido, também as populações enfrentam o desafio da adaptação a este fenómeno em crescente complexificação. Os incêndios rurais, por serem episódios com crescente potencial destrutivo (Costa et al., 2020), conferem um risco acrescido especialmente para aqueles que se estabelecem em áreas onde a perigosidade estrutural é aumentada (artigo 41º da secção II do Decreto-Lei nº 82/2021, de 13 de Outubro Do Ministério Do Ambiente e Ação Climática, 2021).

1.1 Incêndios rurais em Portugal

Resultado da sua posição geográfica, são os países do Mediterrâneo os que mais têm sido fustigados pelos incêndios rurais no seio da união europeia (WWF, 2019). Portugal, em particular, demarca-se com o valor de 1,23% de incidência média anual de incêndios rurais para o intervalo temporal entre 1980 e 2023 (figura 1). Analogamente, o valor médio para o conjunto de países composto por Espanha, França Itália e Grécia estabelece-se em 0,26% (EFFIS - Statistics Portal, 2024). A justificação desta discrepância pode ser fundamentada por múltiplos argumentos, entre os quais se destacam a elevada percentagem de área florestal não gerida; o aumento da quantidade e extensão das cargas de combustíveis; o elevado número de ignições indesejadas em condições adversas, potenciadoras de períodos crescentes de tempo quente e seco, que prolongam e aumentam a gravidade de períodos críticos de incêndio (Beighley & Hyde, 2018).

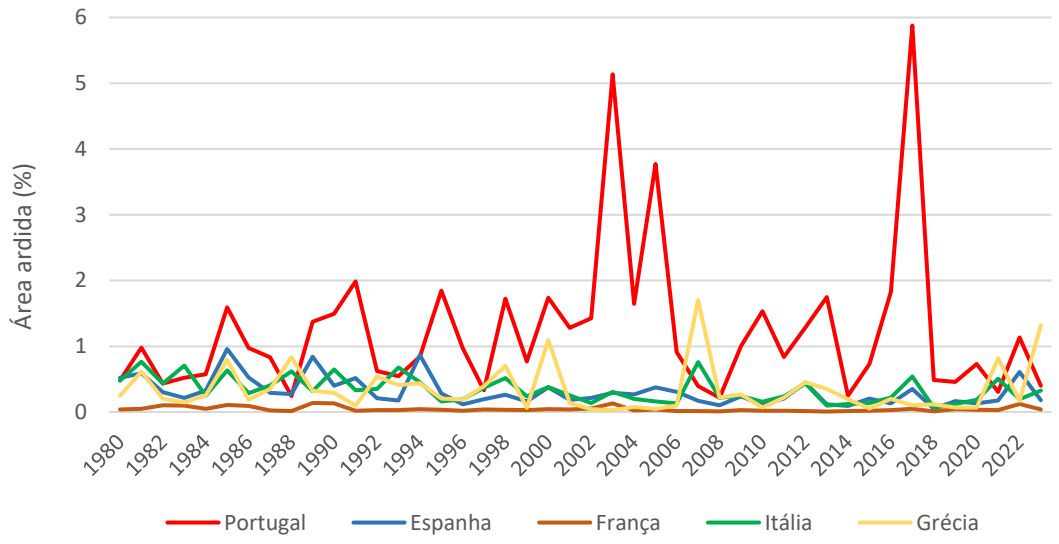


Figura 1 – Comparação da área ardida face à área total em Portugal, Espanha, França, Itália e Grécia (EFFIS, 2024)

Observando os incêndios rurais à luz da sua causalidade, é importante clarificar que os mesmos poderão ter génese natural ou humana. Estes dois grandes grupos podem imediatamente ser subdivididos em outras causas mais específicas, que objetivam classificar de forma mais detalhada o motivo pelo qual se deu a ignição que originou um determinado incêndio. A atribuição de uma causa a um incêndio apenas é possível após um processo de investigação, que em Portugal se encontra atualmente a cargo da Guarda Nacional Republicana (GNR) (Decreto-Lei n.º 22/2006, 2006). Circunscrevendo a análise à investigação de causas em território português entre 2013 e 2023, constata-se uma forte predominância de incêndios onde as causas apuradas têm origem antropogénica (ICNF, 2014a, 2023). Em particular os incêndios resultantes do uso do fogo e causa intencional posicionam-se com importância relativa no conjunto das causas humanas. Entre 2013 e 2023 estas duas causas originaram em média respetivamente 39 % e 29 % da totalidade de incêndios cuja investigação das causas se demonstrou conclusiva. Por oposição, as causas naturais representam em média apenas 2 % dos incêndios ocorridos no período análogo (ICNF, 2014a, 2023).

1.2 Enquadramento legal

Em Portugal, no rescaldo de épocas de incêndio devastadoras (como são exemplo os anos de 2003, 2005 e 2017) verifica-se consistentemente uma necessidade institucional de clarificar a sociedade sobre a catástrofe ocorrida (Oliveira, 2017). Mais do que nunca, após o verão de 2017, era premente apurarem-se os factos para que houvesse um ponto de partida para repensar o futuro do fogo rural e da floresta portuguesa num âmbito geral. Para dar resposta a esta necessidade, a Assembleia da República deliberou a constituição de duas Comissões Técnicas Independentes (CTI) para que, "de forma idónea e credível", se prestassem os devidos esclarecimentos ao país (Comissão Técnica Independente, 2018). As conclusões do relatório da CTI, que revelaram múltiplas vulnerabilidades estruturais e operacionais, serviram então como orientações para a renovação do quadro legal.

Motivado pela supramencionada conjuntura, o Plano Nacional de Gestão

Integrada de Fogos Rurais (PNGIFR) é também a resposta ao término da vigência em 2018 do seu antecessor Plano Nacional de Defesa da Floresta Contra Incêndios (PNDFCI). Aprovado em diário da República através da Resolução do Conselho de Ministros n.º 65/2006, de 26 de maio, o PNDFCI assentava sobre 5 eixos estratégicos: i) aumentar a resiliência do território, ii) reduzir a incidência dos incêndios, iii) melhorar a eficácia e a eficiência do combate aos incêndios, iv) recuperar e reabilitar ecossistemas e comunidades, e v) adaptar uma estrutura orgânica e funcional eficaz (Resolução Do Conselho de Ministros nº 65/2006, 2006).

Instrumento subsidiário do Programa Nacional da Política de Ordenamento do Território (PNPOT), o PNGIFR visa responder às exigências estabelecidas pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 157-A/2017, de 27 de outubro, onde havia sido indicada a reformulação dos princípios do sistema da floresta contra incêndios. É também através do referido diploma que se estabelece a criação da Agência para a Gestão Integrada de Fogos Rurais (AGIF), à qual é atribuída a responsabilidade de coordenação estratégica do Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais (SGIFR) e elaboração e execução do então novo PNGIFR.

O PNGIFR é aprovado em Diário da República através da Resolução do Conselho de Ministros n.º 45-A/2020, de 16 de junho, e estabelece-se com vigência para o horizonte 2020 – 2030. Em linhas gerais, o PNGIFR vincula-se transversalmente a todo o território nacional, às suas instituições e cidadãos, almejando a proteção nacional face a incêndios rurais graves. Esta missão converge com o objetivo explanado no artigo 1º do capítulo I da Lei de Bases da Proteção Civil, onde se define que a "protecção civil é a actividade desenvolvida pelo Estado […] com a finalidade de prevenir riscos colectivos inerentes a situações de acidente grave ou catástrofe, de atenuar os seus efeitos e proteger e socorrer as pessoas e bens em perigo quando aquelas situações ocorram (Lei nº 27/2006, 2006).

O SGIFR assenta sobre dois pilares fundamentais, os quais foram definidos tendo por base o trabalho realizado pelas CTI: a gestão de fogos rurais e a proteção contra incêndios rurais. Para a sua implementação são envolvidos no SGIFR vários intervenientes com papeis distintos. Estes são o Instituto da Conservação da Natureza

e das Florestas, I.P. (ICNF), a GNR, a Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil (ANEPC), as Forças Armadas, as Autarquias, os Bombeiros e as Organizações de Produtores Florestais. No seio do SGIFR é ainda definida uma cadeia de processos (anexo 1) que vai de encontro às responsabilidades das referidas entidades. Esta cadeia é definida em seis fases: planeamento, preparação, prevenção, pré-supressão, supressão e socorro e pós-evento; e por 3 capacitadores: governança, qualificação e sistemas de informação e comunicação. A cada uma das fases é afeto um conjunto de grandes processos (anexo 2) que por sua vez se fazem subdividir em ações específicas. Para que sejam determinadas responsabilidades institucionais em cada uma das ações dos grandes processos, o PNGIFR institui o modelo RASCIFAa. Este serve para definir: i) uma entidade coordenadora, ii) uma entidade responsável (R), iii) uma entidade que aprova a realização da ação (A), iv) entidades que suportam a realização da ação (S), v) as entidades que são consultadas antes, durante ou após a realização da ação (C), vi) as entidades que são informadas antes, durante ou após a realização da ação (I), vii) a entidade que fiscaliza a execução da ação (F) e viii) a entidade que avalia o resultado da ação e promove a articulação entre entidades (Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais 20-30, 2022).

1.3 Prevenção e combate

Segundo CTI (2017, 2018) os incêndios mais severos e frequentes resultaram de uma formulação excessivamente simplificada de um problema complexo (Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais 20-30, 2022). Até então a gestão do fogo fundeava-se pela reatividade negligenciando a proatividade, i.e., reforçavam-se medidas direcionadas ao combate em vez de equacionar o problema dos incêndios rurais tendo por base as suas causas.

Pela análise orçamental do SGIFR (https://www.agif.pt/pt/investimento-no-sgifr) é possível obter uma perspetiva sobre o balanceamento de despesas alocadas à prevenção e ao combate para o período 2017 – 2022 (figura 2). Particularmente observa-se que o combate passou de um financiamento de 115 milhões de euros para

205 milhões de euros em 2022, representando uma taxa de crescimento de 78%; relativamente à prevenção observa-se que a mesma passou de um financiamento de 28 milhões de euros em 2017 para 324 milhões de euros em 2022, representando uma taxa de crescimento de 1 057%. Em 2017 haviam sido investidos na totalidade 143 milhões de euros para a total funcionalidade do SGIFR enquanto em 2022 este valor estabeleceu-se em 529 milhões de euros, representando uma taxa de crescimento de 269%. É clara a alteração do paradigma de subestimação da prevenção, onde em 2017 representava cerca de 20% da totalidade orçamental e em 2022 passa a representar cerca de 61%.

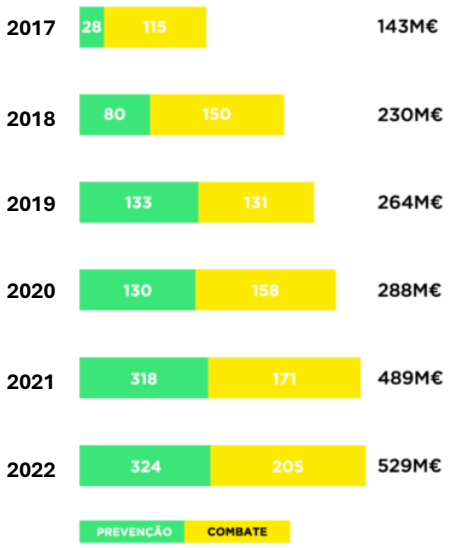


Figura 2 - Balanço de despesa orçamental entre as ações de prevenção e combate para o período 2017 – 2022 (AGIF, 2023)

Segundo o PNGIFR, a prevenção constitui-se como um conjunto de "ações que reduzem a exposição e a vulnerabilidade ao fogo". Para que se efetive este objetivo de acordo com as diretivas operacionais, a cadeia de processos do SGIFR institui quatro grandes processos que procuram estruturar a prevenção contra incêndios rurais em Portugal. Estes são: i) gestão do território rural (PV1), ii) proteção do território edificado (PV2), iii) verificação das condições de segurança (PV3) e iv) fiscalização (PV4).

Especificamente, o grande processo relativo à gestão do território rural (PV1) é competência de coordenação do ICNF. A esta instituição compete conduzir as ações direcionadas à preparação do território rural para o fogo, responsabilizando-se pela gestão de combustíveis, execução e manutenção das redes de defesa e implementação de práticas de valorização do território. Incluídas neste grande processo estão seis ações específicas orientadas para aumentar a resiliência dos territórios rurais ao fogo, destacando-se i) [2] execução da rede primária e das redes de defesa de infraestruturas, ii) [3] execução de áreas de gestão estratégica de combustível, iii) [4] gestão agrícola e silvopastoril e iv) [5] realizar a manutenção, pressupondo que [2], [3] e [4] foram anteriormente executadas (Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais 20-30, 2022).

1.4 Rede primária de faixas de gestão de combustível

O conceito de faixa de gestão de combustível define-se como um local estrategicamente pensado, onde os estratos de vegetação densa, pesada e inflamável são permanentemente alterados de modo a originar novos estratos com um volume inferior de biomassa disponível ou de inflamabilidade mais reduzida (Green, 1977). Estas faixas são habitualmente implementadas como um "corredor" ao longo de linhas de cumeada, estradas ou rios (Agee et al., 2000).

Segundo o diploma que estabelece o SGIFR, as faixas de gestão de combustível são um elemento infraestruturante do espaço rural onde se procede à alteração da estrutura vertical e/ou horizontal da biomassa para atingir a finalidade de "diminuição da superfície percorrida por grandes incêndios, permitindo e facilitando uma intervenção direta de combate ao fogo; redução dos efeitos da passagem de incêndios, protegendo de forma passiva vias de comunicação, infraestruturas e equipamentos sociais, zonas edificadas e formações florestais e agrícolas de valor especial e isolamento de potenciais focos de ignição de incêndios" (Decreto-Lei nº 82/2021, de 13 de Outubro Do Ministério Do Ambiente e Ação Climática, 2021). Segundo o Decreto-Lei supramencionado, as faixas de gestão de combustível

organizam-se em três níveis distintos, especificados como rede primária de faixas de gestão de combustível (RPFGC), rede secundária de faixas de gestão de combustível e rede terciária de faixas de gestão de combustível.

Este conjunto de tipologias de faixas de gestão de combustível designa parte das redes de defesa, especificadas pelo artigo 46º, secção II do capítulo IV do SGIFR. Nos artigos posteriores (47º ao 51º) são enquadrados os objetivos e especificidades de instalação de cada uma das redes de faixas de gestão de combustíveis. Para que atinja as finalidades para a qual foi concebida, os troços que compõem a RPFGC não devem ter uma largura inferior a 125 m, promovendo a compartimentação de áreas entre 500 a 10 000 ha. O planeamento, a instalação e a manutenção desta infraestrutura de defesa da floresta deve considerar i) a sua eficácia na supressão de incêndios de grande dimensão; ii) a segurança das forças em operação; iii) o valor socioeconómico, paisagístico e ecológico dos territórios rurais; iv) as características fisiográficas e as particularidades da paisagem local; v) o histórico dos grandes incêndios na região e o seu comportamento previsível em situações de meteorologia favorável à progressão do fogo e vi) as atividades que nelas se possam desenvolver e contribuir para a sua sustentabilidade técnica e financeira (Decreto-Lei nº 82/2021, de 13 de Outubro Do Ministério Do Ambiente e Ação Climática, 2021).

A RPFGC é materializada legalmente em Portugal no ano de 2006, por via da estratégia definida no então aprovado PNDFCI. Este definia que a RPFGC deveria ter o seu planeamento assente em dois níveis diferentes, o distrital e o municipal. Ao nível distrital, preconizado nos Planos Distritais de Defesa da Floresta Contra Incêndios (PDDFCI), incumbia-se a determinação de um modelo de priorização para a execução da infraestrutura, a determinação do seu traçado, o desenho e divisão dos troços à escala 1:10 000, a priorização dos troços em dois níveis e a divisão dos troços em áreas homogéneas (ICNF, 2014b). Por sua vez, ao nível municipal e com materialização nos Planos Municipais de Defesa da Floresta Contra Incêndios (PMDFCI), era imposto o desenvolvimento de um novo trabalho de vectorização dos troços com o nível de prioridade mais elevado à escala 1:5 000. Com a instituição do PNGIFR, a RPFGC passa a definir-se nos Planos Regionais de Ação (PRA), consequentemente integrada nos

Planos Sub-Regionais de Ação (PSA) e nos Programas Municipais de Execução (PME). A calendarização para a implementação e manutenção é realizada com um horizonte de 10 anos, sendo determinado para este período o orçamento e a contratação de recursos.

O ICNF, através do Manual de Rede Primária, concentra um conjunto de orientações técnicas orientadas atualmente às comissões regionais e sub-regionais de gestão integrada de fogos rurais (CRGIFR e CSGIFR, respetivamente). Nestas orientações técnicas é sugerido um modelo de RPFGC que se subdivide em dois tipos de intervenção: faixa de redução de combustível (FRC) e faixa de interrupção de combustível (FIC). A primeira intervenção consiste na "remoção do combustível de superfície (herbáceo, subarbustivo e arbustivo), abertura de povoamentos e supressão da parte inferior das copas", enquanto a segunda intervenção sugere a remoção total dos combustíveis. Atentando na figura 3, é possível observar a implementação destes dois tipos de intervenção. A FIC faz-se representar bilateralmente à rede viária (RV), removendo todos os extratos vegetais até ao solo mineral ao longo de 10 m; por sua vez, a FRC na secção proximal à FIC promove uma descontinuidade vertical e entre copas com cerca de 4 m e na secção distal à FIC (limite exterior da faixa) mantém a descontinuidade vertical de 4 m, reduzindo o espaçamento entre copas para 2 m.

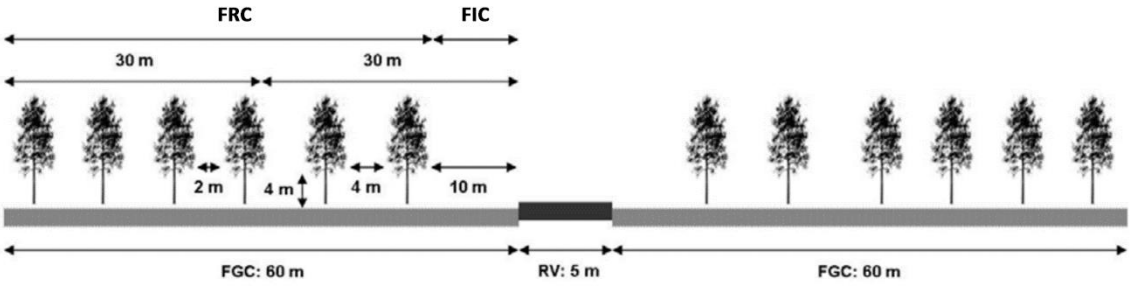


Figura 3 - Secção transversal do modelo de RPFGC, adaptado (ICNF, 2014)

Para efetivar a RPFGC planeada a nível nacional é necessário um avultado volume de recursos. Tomando como exemplo o PRA da região Centro, está orçamentado um investimento de 50 milhões de euros para o "garantir a gestão da RPFGC", projeto este integrado no objetivo estratégico respeitante à diminuição da carga de combustível à escala da paisagem (Comissão Regional de Gestão Integrada de Fogos Rurais do Centro, 2022). Também através do Plano de Recuperação e Resiliência (PRR), nomeadamente através do investimento RE-C08-i03, foram financiados 120 milhões de euros para operacionalizar a RPFGC. Entende-se que por este motivo seja da maior pertinência investigar-se acerca da utilidade desta infraestrutura, colocando em perspetiva a forma como a RPFGC tem cumprido as funções para as qual foi concebida.

1.5 Objetivo

Se o planeamento, instalação e manutenção da RPFGC deve ser, segundo diploma, tangível na eficácia da supressão de incêndios rurais de grande dimensão, há que ressalvar que atualmente a quantificação dessa eficácia é desconhecida. Atentando às funções descritas para esta infraestrutura (estabelecidas no Decreto-Lei n.º 82/2021, de 13 de Outubro do Ministério do Ambiente e Ação Climática, 2021), considera-se que a RPFGC é eficaz quando detém espacialmente o crescimento de um incêndio, i.e., constrange o seu perímetro contribuindo de forma ativa ou passiva para a sua extinção (Moreira et al., 2011).

O objetivo da presente dissertação finda na avaliação de eficácia da RPFGC aquando da existência de contacto com um incêndio real. Especificamente procura-se entender quais os fatores que tendem a moderar a contacto estabelecido entre o incêndio rural e os troços de RPFGC, observando as condições em que esta infraestrutura auxilia a contenção do fogo. Prevê-se que os benefícios deste esforço se traduzam num entendimento mais profundo acerca das potenciais condições em que a RPFGC contém um incêndio, derivando contributos para a melhoria do planeamento desta infraestrutura.

Para alcançar este objetivo geral estruturam-se um conjunto de objetivos

específicos, nomeadamente: i) revisão bibliográfica acerca de métodos de avaliação de eficácia da RPFGC ou de infraestruturas com características e objetivos semelhantes; ii) definição de um conjunto de casos de estudo, onde tenha havido contacto entre um incêndio rural e um ou mais troços de RPFGC em Portugal continental, por forma a analisar a sua interação; iii) desenvolvimento de uma metodologia de avaliação automática da eficácia da RPFGC, a aplicar a cada um dos casos de estudo; iv) análise das condições em que os incêndios interagiram com a RPFGC.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Definição da estratégia de pesquisa e dos critérios sistemáticos

Para melhor entender quais os esforços científicos levados a cabo com o intuito de definir métodos de análise de eficácia de faixas de gestão de combustível, implementou-se uma revisão bibliográfica com critérios sistemáticos. Apesar de ter havido uma constante validação de resultados através da utilização do motor de busca Google Académico e da base de dados Scopus, a estratégia definida para a presente revisão de literatura determinou a o recurso a uma única base de dados, a EBSCO. Após investigação sobre o tema, entendeu-se que para obter resultados que se orientassem com o objeto de estudo era imprescindível integrar três expressões em inglês na *query* de pesquisa: *fuel* – combustível, *break* – quebra e *effectiveness* – eficácia.

Para além da estratégia de pesquisa, houve necessidade de definir critérios de inclusão e de exclusão, que após a pesquisa inicial, serviram para filtrar o conteúdo científico com relevância para o presente trabalho. Como critérios de inclusão definiu-se: i) acesso ao texto integral; ii) redação em inglês; iii) sem limitações quanto ao ano de publicação e iv) elegibilidade com base no título, que deve respeitar as regras

implementadas pela *query.* Os critérios de exclusão incluem i) artigos duplicados; ii) artigos não relacionados com o objeto de estudo e iii) artigos que apresentam métodos orientados à avaliação da manutenção e não da eficácia.

A pesquisa levada a cabo pela *query* - TI (fuel* OR fire) AND TI (break* OR gap* OR strip*) AND TI (effective* OR assess* OR evaluat*) – ilustrada pelo fluxograma da figura 4, resultou em 43 artigos revistos por pares e com texto integral disponível. Após congregar estes artigos recorrendo ao gestor de referências bibliográficas Mendeley Reference Manager (Mendeley, s.d.), procedeu-se à fase de seleção onde se viriam a aplicar os critérios de inclusão e de exclusão. Dos 43 artigos resultantes da pesquisa, 39 acabaram por ser excluídos. Enunciando os critérios de exclusão, sete artigos encontravam-se em duplicado, 30 artigos não se alinhavam com o objeto de estudo, um artigo não era redigido em inglês e um artigo, que apesar de retratar um método aplicado à RPFGC, debatia sobre a avaliação da sua manutenção e não da sua eficácia. Desta seleção resultaram quatro artigos científicos que propunham e debatiam métodos de avaliação da eficácia de faixas de gestão de combustível.

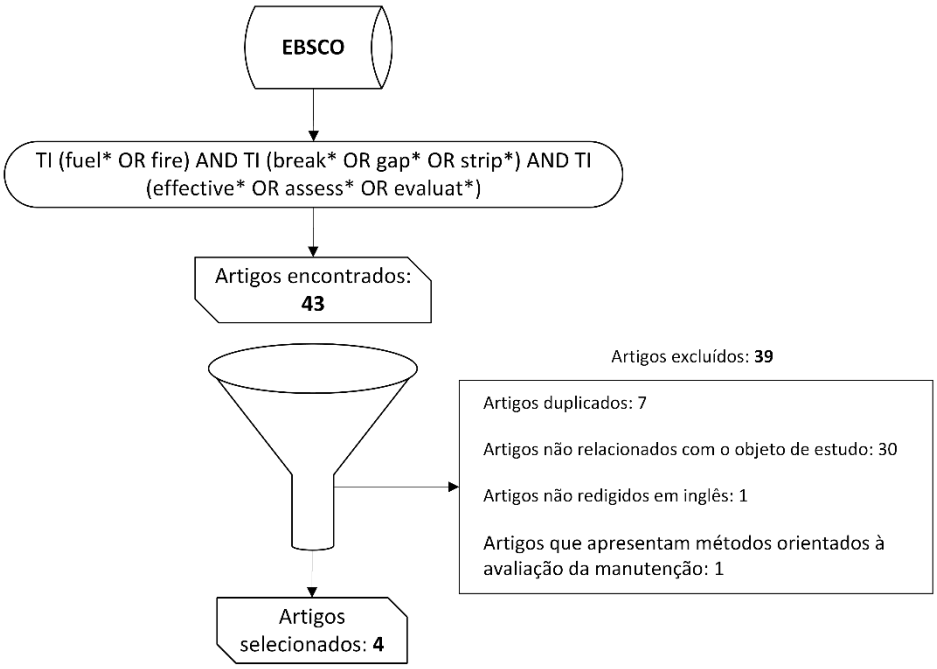


Figura 4 – Fluxograma da revisão com critérios sistemáticos

2.2 Métodos de avaliação de eficácia de faixas de gestão de combustível

Observando a quantidade de artigos selecionados pela pesquisa com critérios sistemáticos, facilmente nos apercebemos que a investigação desenvolvida em torno da avaliação da eficácia de faixas de gestão de combustível é ainda escassa (Agee et al., 2000; Gannon et al., 2023; Rigolot & Alexandrian, 2006). Em particular, tanto quanto se sabe à data da elaboração desta dissertação, identificam-se apenas dois trabalhos que se debruçam acerca da avaliação da eficácia da RPFGC portuguesa. Por forma a avaliar localizações prioritárias para a instalação da RPFGC, Aparício et al. (2022) desenvolve numa primeira instância um método de avaliação de eficácia baseado na simulação de incêndios em Portugal continental (Alcasena et al., 2021). As interseções identificadas entre os troços da RPFGC executada e os incêndios modelados são considerados segundo dois cenários distintos: i) contenção total do incêndio nos troços de RP e ii) transposição total ou parcial do incêndio nos troços de RPFGC. Posteriormente, a eficácia é avaliada tendo em conta a redução de três indicadores: i) área ardida por grandes incêndios (>500 ha); ii) número de edifícios residenciais expostos ao incêndio e iii) área ardida no interior de áreas protegidas.

Por sua vez, Oliveira et al. (2016) analisa a eficácia da RPFGC proposta para 20 concelhos da região algarvia. O autor opta igualmente pela modelação de incêndios, considerando-os segundo três cenários distintos: i) inexistência de gestão de combustíveis; ii) RPFGC na forma de FIC e iii) RPFGC na forma de FRC. Para cada cenário é estimada a influência na probabilidade de ocorrência de incêndios, na dimensão dos incêndios e na área ardida. A metodologia destes dois trabalhos possui em comum a analise da eficácia segundo a simulação de incêndios e a definição de cenários relativos à funcionalidade da RPFGC.

Antagonicamente aos dois métodos que se apresentaram, existem abordagens alternativas que optam por avaliar a eficácia das faixas de gestão de combustível de forma empírica, i.e., modelam a interação entre incêndios ocorridos e as faixas de gestão de combustível coincidentes com os mesmos. Para Portugal, tanto quanto foi apurado à data de realização desta dissertação, não existe abordagem semelhante

implementada.

Ortega et al. (2024) apresenta uma abordagem empírica para modelação da eficácia das faixas de gestão de combustível no sul de Espanha. Partindo do pressuposto que a eficácia é dependente de um vasto conjunto de fatores, o principal objetivo deste trabalho consiste na análise quantitativa do potencial das faixas de gestão de combustível, utilizando como *input* variáveis relacionadas com a topografia, meteorologia, combustíveis, comportamento do fogo, estratégia de supressão e características das faixas de gestão de combustível. Na totalidade são consideradas 23 variáveis independentes, que após submetidas a análise exploratória, são utilizadas na construção de três modelos: regressão logística, árvores de decisão e redes neuronais artificiais. O conjunto de dados incluía 563 interseções entre fogo e faixas de gestão de combustíveis, extraídas a partir da análise de 220 incêndios rurais ocorridos entre 2011 e 2018. A identificação da contenção do incêndio em cada uma das interseções foi validada de manualmente. Os resultados indicam que são as redes neuronais artificiais o modelo com maior exatidão (89,3%), i.e., mediante o conjunto de variáveis de *input* deriva mais vezes resultados concordantes com a eficácia observada em cada interseção. No entanto, a utilização das árvores de decisão são uma opção facilitadora da interpretação de resultados dada a possibilidade de visualização da estrutura de decisão. Este trabalho evidência que a estratégia de supressão e os meios por ela utilizados (terrestres e/ou aéreos) é a variável que determina com maior peso o sucesso ou insucesso das faixas de gestão de combustível na contenção de um incêndio. Apesar de uma modelação completa, fazendo recurso a um heterogéneo conjunto de variáveis, uma das maiores debilidades encontra-se na própria verosimilhança dos dados referentes à estratégia de supressão e utilização das faixas de gestão de combustível durante as operações. A responsabilidade da recolha destes dados é incumbida a vários operacionais, com critérios e experiência distinta, resultando segundo os autores em dados imprecisos e subjetivos.

Com método semelhante Gannon et al. (2023) propôs a avaliação da eficácia de faixas de gestão de combustível nas florestas nacionais do sul da Califórnia. Para atingir este objetivo os autores recorreram à estatística multivariada para a

construção de cinco modelos com *inputs* diferentes, baseados no algoritmo *gradient boosted regression trees*. Neste trabalho é considerado um conjunto de dados mais alargado comparativamente com Ortega et al. (2024), uma vez que são consideradas 38 953 interseções entre o fogo e as faixas de gestão de combustível. As referidas interseções são extraídas a partir da análise de 22 incêndios ocorridos entre 2017 e 2020. As variáveis com maior importância relativa estão tematicamente relacionadas com a estratégia de supressão, meteorologia e comportamento estimado do fogo.

Weise et al. (2023) avalia a eficácia das faixas de gestão de combustível executadas no bioma da *Artemisia spp.,* limitando a área de estudo a 161 milhões de hectares do oeste dos Estados Unidos da América. Em particular, este trabalho procurou alcançar três objetivos distintos: i) estimar a eficácia das faixas de gestão de combustível na alteração do comportamento do fogo no bioma em análise; ii) identificar as condições em que a eficácia das faixas de gestão de combustível é potenciada e iii) desenvolver cartografia preditiva acerca do sucesso das faixas de gestão de combustível. O conjunto de interseções para análise resulta da sobreposição espacial de todos os perímetros de incêndio ocorridos entre 1985 e 2018 e a base de dados das faixas de gestão de combustível executadas, proveniente do repositório da *Geospatial Multi-Agency Coordination*. *Baysian generalized linear mixed model* foi o modelo implementado*,* que por sua vez integrou como *input* um conjunto de 113 variáveis independentes relacionadas com as condições observadas das faixas de gestão de combustível, carga de combustível, meteorologia de incêndio, acessibilidade, topografia e comportamento do fogo. Para determinar se uma interseção havia resultado na determinação do perímetro do incêndio, houve um trabalho de validação manual de cada uma das interseções identificadas por métodos de análise espacial. Este procedimento metodológico compreende-se como uma tarefa de análise visual de imagem morosa com um elevado consumo de recursos, adicionando-se a incerteza imposta pela subjetividade da interpretação.

Em suma, evidencia-se que as abordagens empíricas à avaliação da eficácia das faixas de gestão de combustível têm vários procedimentos metodológicos em comum, destacando-se:

- Avaliação do desempenho das faixas de gestão de combustível enquanto infraestrutura com potencial de alteração de comportamento do fogo em caso de incêndio rural;
- Circunscrição de uma área de estudo e de um período temporal de análise;
- Determinação dos locais onde se registou a interação entre o incêndio e a faixa de gestão de combustível, observando-se simultaneamente se houve contenção do perímetro de incêndio naquele local;
- Levantamento da *ground truth* da variável dependente – a eficácia;
- Definição das variáveis independentes caracterizadoras da relação estabelecida entre o fogo e as faixas de gestão de combustíveis, entre as quais se apresentam a gestão de combustível, estratégia de supressão adotada, topografia, meteorologia, características dos combustíveis e comportamento do fogo estimado;
- Implementação de algoritmos de classificação ou previsão para modelar a eficácia esperada, tendo por base o conjunto de variáveis independentes pré-processadas.

Nesta instância importa também clarificar a expressão "comportamento do fogo", sendo este um conceito amplamente adotado quando o objetivo é caracterizar a forma como o incêndio se propaga ao longo da paisagem (Benali et al., 2023). Comportamento do fogo refere-se habitualmente a três componentes que descrevem i) a velocidade com que o fogo se propaga, ii) a energia libertada durante a combustão e iii) o tempo decorrido durante essa combustão (Finney et al., 2021). Particularmente são consideradas quatro métricas do comportamento do fogo, nomeadamente a velocidade de propagação, a taxa de expansão, a intensidade do fogo e o comprimento de chamas, relacionando-as com variáveis ambientais, tais como o relevo, os combustíveis ou as condições meteorológicas.

3 METODOLOGIA

Neste capítulo pretende-se apresentar a abordagem metodológica desenvolvida para análise da eficácia da RPFGC. Para atingir este fim foi implementada uma lógica diferenciada, que explora a relação estabelecida entre o incêndio e os troços de RPFGC executados à data da sua ignição. Por forma a esquematizar a abordagem metodológica, o fluxograma da figura 5 resume o encadeamento dos seis principais passos adotados.

Figura 5 – Fluxograma do método proposto para análise de eficácia da RPFGC

Especificamente, o primeiro passo desta abordagem remete para a definição de objetivos. Verificando-se a inexistência de uma estratégia de avaliação da eficácia da RPFGC em Portugal desenvolvem-se metas para este trabalho, sobre as quais se pode aprofundar no ponto 1.5 da introdução. O segundo passo consiste no levantamento das variáveis úteis à modelação da eficácia da RPFGC. Este esforço é resumido no capítulo 2 – revisão bibliográfica, onde se explora o contexto científico do tema em questão. O terceiro passo – recolha de dados – ocorre após a solidificação da abordagem à modelação da eficácia, agregando os conjuntos de dados fundamentais à análise subsequente. Este passo é apresentado no ponto 3.1 do presente capítulo. Após o processo de recolha de dados, seguiu-se a identificação de potenciais casos de estudo, analisando a relação espacial de sobreposição entre os incêndios e os troços de RPFGC executada. O ponto 3.2 do presente capítulo aborda em detalhe esta questão, especificando-se ao longo de dois subpontos.

Uma segunda fase desenvolveu-se com o objetivo de localizar e caracterizar as interseções, sendo esta uma parte significativa do conjunto de procedimentos metodológicos levados a cabo neste trabalho. Consideram-se as interseções como a unidade mínima de análise, representando um local onde se verificou contacto entre o incêndio e o troço de RPFGC. A cada uma das interseções é associada uma dimensionalidade espacial por meio de uma coordenada geográfica, adicionando-se os atributos respeitantes a cada uma das variáveis independentes selecionadas. Este passo é especificado ao longo do ponto 3.3 da metodologia. Construída a base de dados de interseções, iniciou-se a fase de avaliação da eficácia da RPFGC. Para tal, no ponto 3.4 explica-se de que forma foram empregues os métodos de aprendizagem automática para exploração dos dados e avaliação da influência das variáveis.

No que concerne às tecnologias adotadas, optou-se maioritariamente pela utilização de ferramentas proprietárias. No âmbito das ferramentas de sistemas de informação geográfica (SIG) recorreu-se ao *software desktop ArcGIS Pro* (ESRI, s.d.-a), destinado à exploração, visualização, gestão e análise de dados geográficos. Com maior importância ainda, utilizou-se a biblioteca *ArcPy* (ESRI, s.d.-b) como meio de automatizar o fluxo de processamento de dados geográficos com recurso à linguagem de programação *Python* (Python.org, s.d.). A biblioteca *ArcPy* consiste na disponibilização de toda a infraestrutura de geoprocessamento integrada no *ArcGIS Pro*, com a vantagem de integrar essas mesmas ferramentas em *scripts Python*. Desta forma é possível automatizar a exploração de dados com ferramentas proprietárias, integrando ocasionalmente componentes de *software open source*. Para construção de *scripts Python* recorreu-se a uma infraestrutura de desenvolvimento integrada *freeware*, o *Visual Studio Code* (Microsoft, s.d.). Este tipo de infraestrutura auxilia o desenvolvimento de programas fornecendo, por exemplo, suporte de depuração, controlo de versões e complementação inteligente de código. Já na fase final, a análise exploratória e a aplicação do classificador são realizadas com recurso ao *software KNIME Analytics Platform* (KNIME, s.d.-b). Esta plataforma de exploração de dados gratuita é munida com uma forte componente de interface gráfica, que possibilita uma intuitiva construção de sistemas modulares de interconexão de nós.

3.1 Recolha de dados

Dado o objetivo anteriormente enquadrado, evidenciam-se à partida dois conjuntos de dados críticos para a identificação e caracterização das interseções. Estes dizem respeito à informação acerca dos troços de RPFGC executados e às progressões de incêndios ocorridos. Este primeiro conjunto de dados foi cedido pelo ICNF, com dimensionalidade espacial segundo o modelo de dados vetorial. Os polígonos delimitam as áreas intervencionadas, às quais se associa um importante atributo que identifica o ano em que ocorreu a última redução ou eliminação do volume de biomassa. No anexo 3 demonstra-se o mapa à escala nacional dos troços de RPFGC planeados e executados.

O segundo conjunto de dados crítico, respeitante às progressões de incêndios rurais, deriva da base de dados PT-FireSprd (Benali et al., 2023) e da sua versão 2.0 não publicada. A PT-FireSprd contém a reconstrução da evolução espácio-temporal de incêndios rurais, objetivando catalogar o comportamento do fogo de 80 grandes incêndios (área superior a 100 ha) ocorridos entre 2015 e 2021. A versão 2.0 recursa à metodologia da primeira versão, atualizando a base de dados com 15 incêndios ocorridos entre 2021 e 2023. Para determinar os polígonos de progressão, i.e., limites geográficos de quando e onde é que o incêndio progrediu, o método proposto por Benali et al., (2023) faz recurso a imagens de satélite, imagens capturadas por meios aéreos nos teatros de operação, informação recolhida no terreno e a dados oficiais (como por exemplo o ponto de ignição identificado pela GNR e disponibilizado pelo ICNF). O anexo 4 esquematiza esta integração de múltiplas fontes de dados para a reconstrução dos polígonos de progressão.

Após serem identificados múltiplos potenciais casos de estudo através da confrontação espacial entre a base de dados de progressões de incêndios e a camada da RPFGC executada, houve necessidade de validar a existência de relação espacial entre a os troços executados e os incêndios. Determinou-se que para tal tarefa seriam utilizadas imagens do satélite Sentinel 2, uma vez que esta é a plataforma que oferece no nosso território o melhor compromisso entre resolução espacial, temporal e

radiométrica, mantendo a política de dados abertos. O acesso a estes dados foi feito através do *Copernicus Browser* (*Copernicus Browser*, s.d.), parte integrante do ecossistema de dados espaciais do programa europeu *Copernicus*. Para validar individualmente as interseções referentes a cada potencial caso de estudo, fez-se uso da imagem disponível com a data mais próxima ao início do incêndio, garantindo que a cobertura de nuvens seria sempre inferior a 10% relativamente à área total da imagem. Atendendo à aplicação deste conjunto de dados, descarregaram-se apenas as bandas associadas à proporção visível do espectro eletromagnético (B02, B03 e B04) complementando com a banda que regista o comprimento do onda infravermelho próximo (B08) (Sentinel Hub, 2024).

Com o intuito de explorar o comportamento do fogo na dimensão da energia libertada, é necessário recorrer a modelos de combustível enquanto descritores da vegetação dos espaços florestais. Os modelos de combustível podem ser entendidos como a "quantificação das propriedades de um complexo combustível", através da qual é descrita por exemplo, a carga de combustível por classe de tamanho, poder calorífico e o teor de humidade do combustível considerando o seu estado fisiológico (morto ou vivo) (Fernandes et al., 2009). Para o presente trabalho recorreu-se aos modelos de combustível construídos segundo a metodologia proposta por Sá et al. (2023). O mapa de combustíveis (que representa espacialmente os vários modelos de combustível através de uma superfície raster) é produzido com frequência anual, recorrendo essencialmente a conjuntos de dados relacionados com uso e ocupação do solo e áreas percorridas pelo fogo. Uma vez selecionados os casos de estudo, identificou-se que eram necessários os mapas de combustíveis construídos para os anos de 2020, 2021, 2022 e 2023, sendo utilizado para cada caso de estudo o mapa de combustíveis com correspondência anual.

A integração de um modelo digital de terreno foi também necessária para que se pudesse caracterizar a relação estabelecida entre a RPFGC e os incêndios. Optou-se por utilizar o EU-DEM, produto mantido até 2016 pelo *Copernicus Land Monitoring Service.* Este modelo digital de terreno com representação europeia, é resultante da fusão de dados de fontes como SRTM e ASTER GDEM. O EU-DEM cobre a superfície de

Portugal continental através de dois *tiles com espaçamento de 5 graus* (eu_dem_v11_E20N10 e eu_dem_v11_E20N20).

Por último foram integrados dados referentes às condições piro-meteorológicas estimadas para os dias em que se desenvolveram as ocorrências utilizadas como casos de estudo. Especificamente recorreu-se aos serviços de disponibilização de dados do Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) para descarregar múltiplos ficheiros em formato NetCDF. Cada ficheiro NetCDF (formato com capacidades multidimensionais na forma de *array*) congrega várias camadas de dados, cada uma referente a um índice meteorológico de incêndio específico. Os referidos índices meteorológicos são os integrantes do *Canadian Forest Fire Weather Index System* (CFFWIS), nomeadamente o índice principal *Fire Weather Index* (FWI) e os sub-índices *Initial Spread Index* (ISI), *Buildup Index* (BUI), *Fine Fuel Moisture Code* (FFMC), *Duff Moisture Code* (DMC) e *Drought Code* (DC) (*Canadian Wildland Fire Information System*, s.d.). De forma sistemática, cada NetCDF representa uma validade de 24h, a partir do qual é possível extrair uma camada raster por cada índice meteorológico de incêndio enunciado.

Na tabela 1 resumem-se os conjuntos de dados utilizados, bem como as suas principais características, nomeadamente a sua fonte, o ano ou período, o modelo de dados sob o qual são disponibilizados, a tipologia (no caso de informação vetorial) ou a resolução espacial (no caso da informação matricial) e o seu sistema de referência original.

Tabela 1 – Conjuntos de dados utilizados e as principais características

Conjunto de dados	Origem	Ano	Modelo de dados	Formato	Tipologia / resolução	Sistema de referência
RPFGC executada	ICNF, I.P.	[2009 – 2023]	Vetorial	.shp	Polígono	ETRS 89 PT TM06
Progressões de incêndios rurais	Benali et al., 2023	[2015 – 2023]	Vetorial	.shp	Polígono	WGS 84 UTM 29N
Imagens Sentinel 2	Copernicus	[2020 – 2023]	Matricial	.tif	10 m	WGS 84 UTM 29N
Modelos de combustíveis	Sá et al., 2023	[2020 – 2023]	Matricial	.asc	100 m	WGS 84 UTM 29N
Modelo digital de terreno	Copernicus	2016	Matricial	.tif	25 m	ETRS 89 LAEA
Índices meteorológicos de incêndio	IPMA, I.P.	[2020 – 2023]	Matricial	.nc	1 300 m	ETRS 89 PT TM06

3.2 Identificação dos casos de estudo

Um potencial caso de estudo figura-se como um incêndio rural cuja dimensionalidade geográfica, i.e., a sua área ardida, interseta em algum momento pelo menos um troço da infraestrutura executada na forma de RPFGC. Para identificar potenciais casos de estudo procedeu-se à definição de uma elementar estratégia de análise espacial, destinada a intersetar os 95 grandes incêndios integrados pela base de dados PT-FireSprd (versão 1.0 e 2.0) com os dados relativos à execução da RPFGC disponíveis. Por forma a evitar a existência de falsos negativos (incêndios que contactaram com RPFGC onde a interseção não foi detetada) esta sobreposição foi avaliada com uma margem de 500 m.

Na figura 6 exemplifica-se a estratégia de análise espacial definida, demonstrando-se três situações possíveis de relacionamento espacial entre um incêndio e um troço de RPFGC. Em a) exemplifica-se uma primeira situação de sobreposição de um troço de RPFGC à área impactada pelo incêndio tomado como exemplo. Nesta situação o incêndio torna-se inquestionavelmente um potencial caso

de estudo. Em b) demonstra-se a redundância para evitar a existência de falsos negativos, onde se aceitam incêndios como potenciais casos de estudo se os mesmos se aproximem pelo menos 500 m de um troço de RPFGC. Em c) ilustra-se uma situação em que o incêndio é inelegível como caso de estudo uma vez que se afasta mais de 500 m do troço de RPFGC em qualquer uma das suas coordenadas perimétricas.

De modo a realizar esta análise utilizou-se uma das ferramentas de gestão de dados integrada no software desktop *ArcGIS Pro* designada *Select Layer By Location*. A sua finalidade prende-se com a seleção de dados numa primeira camada de informação geográfica (neste caso, os incêndios da base de dados PT-FireSprd) baseada na relação espacial estabelecida com uma segunda camada de informação geográfica (troços de RPFGC executados). A relação espacial parametrizada foi a interseção simples e a redundância para avaliação de falsos negativos foi implementada com o valor de 500 m no parâmetro *search distance*.

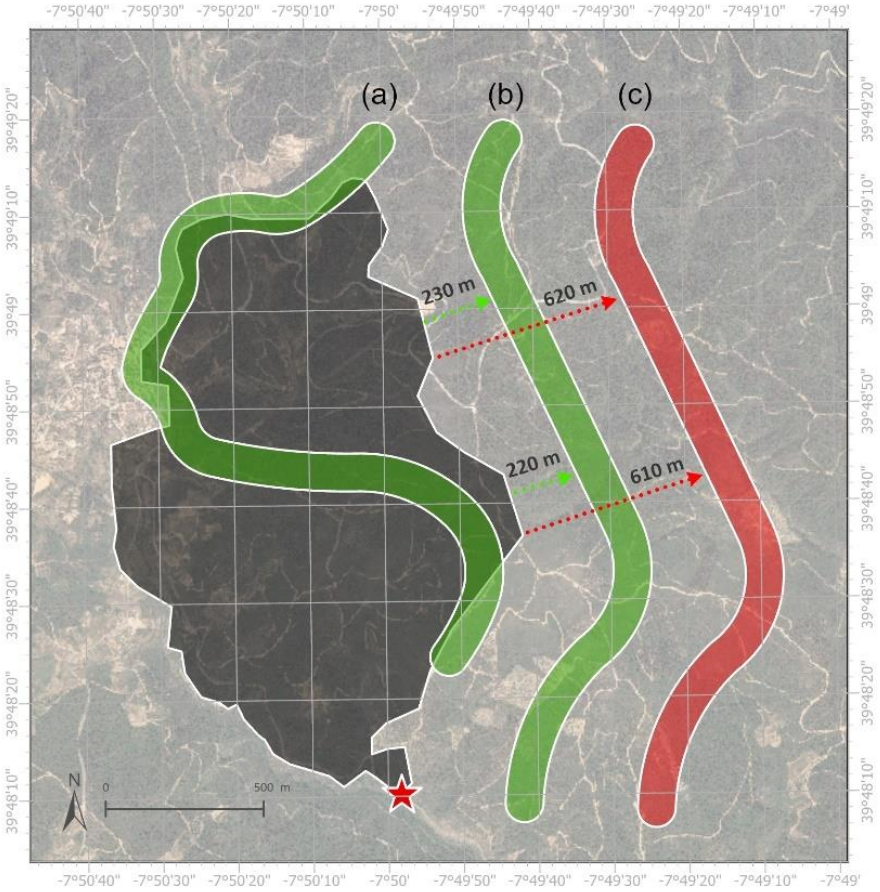


Figura 6 - Processo de análise espacial da interseção de RPFGC com incêndio para deteção de potenciais casos de estudo

Preliminarmente resultou a identificação de sete potenciais casos de estudo, respeitantes a incêndios ocorridos entre 2020 e 2023. Trata-se dos incêndios de Sardeiras de Baixo (Oleiros, 2020), Conqueiros (Proença-a-Nova, 2020) e Monchique (2021), São Marcos da Serra (Silves, 2022), Garrocho (Covilhã, 2022), Carrascal (Castelo Branco, 2023) e Vale de Prazeres (Fundão, 2023).

3.2.1 Enquadramento geográfico dos casos de estudo selecionados

Os casos de estudo selecionados localizam-se em duas regiões distintas de Portugal continental. O primeiro agrupamento de incêndios localiza-se na Região Centro, especificamente nas sub-regiões da Beira Baixa e Beiras e Serra da Estrela. Pelo mapa ilustrado na figura 7, este agrupamento da Região Centro inclui os incêndios de Sardeiras de Baixo (1), Conqueiros (2), Garrocho (5), Carrascal (6) e Vale de Prazeres (7). O segundo agrupamento de incêndios localiza-se na Região do Algarve, com correspondência a uma única sub-região com a mesma designação. Nesta região são agrupados os incêndios de Monchique (3) e São Marcos da Serra (4).

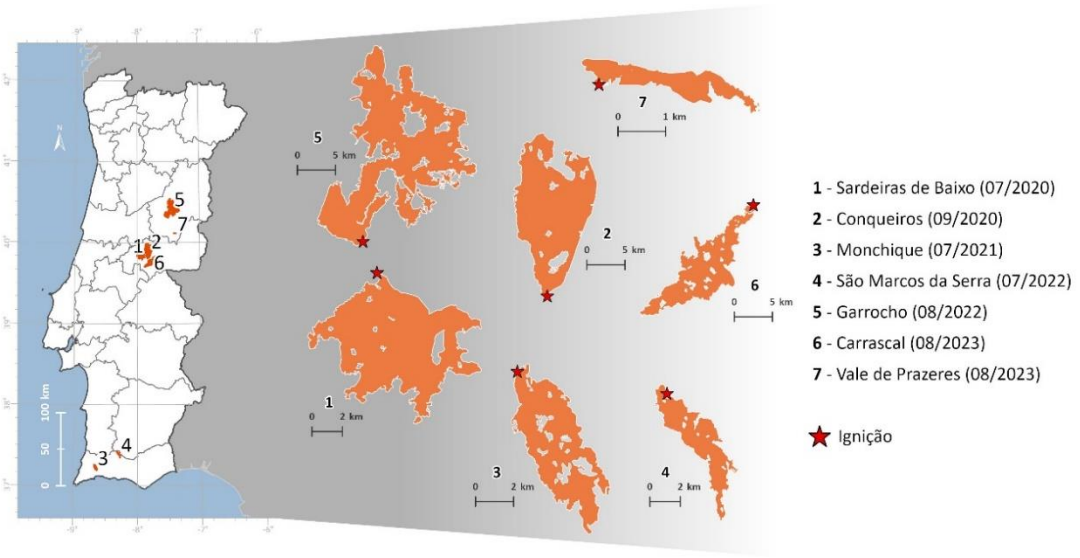


Figura 7 - Mapa de enquadramento dos casos de estudo selecionados

As sub-regiões da Beira Baixa e Beiras e Serra da Estrela encerram em si a continentalidade da Região Centro, sendo as únicas unidades territoriais desta Região a estabelecer fronteira com Espanha. Caracterizadas pelo progressivo despovoamento refletido entre os Censos 2011 e 2021, pela baixa densidade populacional e centros urbanos de média dimensão, estas sub-regiões desempenham uma posição estratégica estabelecendo-se como *pivot* entre o centro litoral português e Espanha. No que concerne a áreas protegidas, a sub-região das Beiras e Serra da Estrela integra totalmente o Parque Natural da Serra da Estrela e parcialmente o Parque Natural do Douro Internacional. Com a sub-região da Beira Baixa partilha a Paisagem Protegida Regional da Serra da Gardunha e a Reserva Natural da Serra da Malcata. O Parque Natural do Tejo Internacional é integrado totalmente pela sub-região da Beira Baixa. Em termos climatológicos, a sub-região da Beira Baixa caracteriza-se por um clima temperado com verão quente e seco (Csa, na classificação Koppen-Geiger) em todo o seu território. Dicotomicamente, a região das Beiras e Serra da Estrela divide a sua classificação climática em função da altitude. De forma geral é o clima temperado com verão seco e temperado (Csb) que detém maior representação, considerando-se excecionalmente um clima temperado sem estação seca e com verão temperado (Cfa) para as zonas de maior altitude (Comissão Regional de Gestão Integrada de Fogos Rurais do Centro, 2022). Quanto ao uso do solo, na sub-região das Beiras e Serra da Estrela (anexo 5 – 1) a floresta ocupa 34,7% do território, sendo maioritariamente composta pela floresta de pinheiro-bravo; na sub-região da Beira Baixa (anexo 5 – 2) a floresta representa 53,6%, destacando-se a floresta de pinheiro-bravo e a floresta de eucalipto.

A Região do Algarve é limitada em cerca de metade do seu perímetro pelo oceano Atlântico, característica que lhe confere uma grande diferenciação demográfica, económica e climática. A este é limitada por Espanha e a norte faz fronteira com a Região do Alentejo. Na Região do Algarve são integradas três importantes áreas protegidas: a oeste, e em continuidade com a sub-região do Alentejo Litoral, encontra-se o Parque Natural do Sudoeste Alentejano e Costa Vicentina; a este, junto à orla costeira, encontram-se o Parque Natural da Ria Formosa e a Reserva Natural do Sapal

de Castro Marim e Vila Real de Santo António. A Região do Algarve enquadra duas classificações climáticas que diferenciam a divisão meridional entre o barlavento e o sotavento algarvio. Esta primeira zona caracteriza-se por um clima temperado com verão seco e temperado (Csb), enquanto a segunda detém um clima temperado com verão quente e seco (Csa) (Comissão Regional de Gestão Integrada de Fogos Rurais do Algarve, 2023). Na Região do Algarve as florestas representam 36,4% da totalidade do território (anexo 5 – 3) e integram essencialmente florestas de sobreiro, pinheiro manso, eucalipto e azinheira.

No anexo 6 ilustra-se uma tabela que enquadra individualmente cada caso de estudo selecionado, resumindo características da ocorrência e do local onde esta se desenvolveu.

3.2.2 Validação dos potenciais casos de estudo

Reunidos os sete potenciais casos de estudo caracterizados na tabela 2, procedeu-se à validação da existência efetiva de RPFGC executada. Até então apenas haviam sido confrontados os dados vetoriais, não havendo certeza acerca da existência de descontinuidade de combustíveis no terreno. Para confirmar esta questão foi utilizada uma imagem de satélite Sentinel 2 por cada potencial caso de estudo. Recorrendo ao compósito RGB de falsa cor e ao índice *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), pretendia-se identificar alterações no padrão da vegetação que correspondessem às características de implantação da RPFGC. A presença ou ausência de vegetação é interpretável através de compósitos RGB falsa cor e do cálculo do NDVI, uma vez que o comportamento espectral da vegetação viva é diferenciável no comprimento de onda infravermelho. De forma particular, o comportamento espectral da vegetação viva caracteriza-se pela absorção do comprimento de onda vermelho, refletindo o comprimento de onda infravermelho (EOS, 2024). Por este motivo, a banda do infravermelho próximo (B08) do sensor MSI a bordo do satélite Sentinel 2 é determinante para o desenvolvimento de aplicações de monitorização do coberto vegetal terrestre.

Tabela 2 - Casos de estudo selecionados para desenvolvimento da análise de eficácia da RPFGC

Caso de estudo	Código SGIFR	Concelho	Data de início
Sardeiras de Baixo	BI220227	Oleiros	25/07/2020
Conqueiros	BI220356	Proença-a-Nova	13/09/2020
Monchique	AG1211131	Monchique	17/07/2021
São Marcos da Serra	2022_08_0038271	Silves	25/07/2022
Garrocho	2022_05_0022298	Covilhã	06/08/2022
Carrascal	20230945339	Castelo Branco	04/08/2023
Vale de Prazeres	20230959663	Fundão	25/08/2023

No anexo 7 - 1 exemplifica-se uma composição RGB em falsa cor construída para validar a existência de contacto entre o perímetro de incêndio de Garrocho e um troço de RPFGC executado em 2020. A substituição da banda do vermelho (B04) pela banda do infravermelho próximo (B08) confere as tonalidades de vermelho brilhante à vegetação densa e saudável, atribuindo o vermelho-escuro/castanho/cinzento a todos os elementos da paisagem que não refletem de forma tão acentuada esse mesmo comprimento de onda.

O NDVI, índice padronizado com adoção generalista em aplicações de monitorização de biomassa, é calculado a partir da diferença relativizada das bandas afetas ao comprimento de onda vermelho e infravermelho próximo. Para calcular o NDVI é utilizada a seguinte fórmula:

$$NDVI = \frac{PIR - VERMELHO}{PIR + VERMELHO}$$

correspondendo à seguinte fórmula quando são utilizados dados Sentinel 2:

$$NDVI = \frac{B08 - B04}{B08 + B04}$$

Os valores do NDVI são normalizados entre -1 e 1. Pixéis com valor aproximado a -1 representam geralmente elementos de paisagem relacionados com água enquanto valores aproximados a 0 podem representar rocha nua, areia ou neve. Quanto mais próximo de 1 for o valor do pixel, maior a probabilidade de o mesmo representar biomassa com alto vigor vegetativo (SentiWiki, s.d.). Através da figura b) ilustrada no anexo 7 – 2, é observável um diminuído vigor vegetativo no interior do troço de RPFGC em comparação com as áreas limítrofes, uma vez que as intervenções silvícolas objetivam a redução ou eliminação do coberto vegetal. Desta forma confirma-se o contacto do incêndio com um troço de RPFGC executado.

3.3 Caracterização das interseções entre o fogo e a RPFGC

No presente ponto explicam-se os vários passos necessários para obter o conjunto de dados utilizado para derivar a análise da eficácia da RPFGC. Mo ponto 3.3.1 enquadra-se sobre a utilidade das progressões de incêndio, explicando de que forma são aplicadas à compreensão do desenvolvimento de uma ocorrência de incêndio rural. Seguidamente, no ponto 3.3.2 explica-se o funcionamento da automatização desenvolvida para processar os sete casos de estudo selecionados, progredindo no ponto 3.3.3 para uma explicação acerca da inclusão e pré-processamento do mapa de combustíveis e do modelo digital de terreno. O ponto afeto à modelação do trajeto provável do fogo destina-se a explicar a lógica inerente à estimação do caminho percorrido pelo fogo ao longo de toda a ocorrência, identificando as principais regras que definem a origem e o destino destes trajetos. Após determinação dos trajetos, clarifica-se acerca da obtenção do conjunto de interseções entre o incêndio e os troços de RPFGC, definindo os procedimentos para a sua classificação binária: eficaz ou não

eficaz na contenção do incêndio. Num último momento formula-se acerca da amostragem das variáveis independentes, a qual ocorre na localização de cada uma das interseções identificadas.

3.3.1 Progressões de incêndio

Os dados de progressão de incêndio, como indicado anteriormente, representam a evolução espácio-temporal de uma determinada ocorrência. A figura 8 ilustra um a) mapa de progressão e o respetivo b) grafo explicativo da evolução temporal. Cada polígono (P) delimita a área percorrida pelo fogo num determinado período, sendo-lhe atribuída uma sequência identificável na forma "data/hora". O limite estabelecido por P é interpretável como uma isócrona. Tomando como exemplo o incêndio ilustrado na figura 8, observa-se que a ignição acontece no P1 e a estabilização do perímetro final ocorre passados 600 minutos, aquando da delimitação do P4. O P2 e o P3 fornecem informação acerca da evolução intermédia do incêndio, demonstrando a sua extensão geográfica aos 120 minutos e aos 360 minutos da ocorrência. A partir destes dados é possível estimar sobre o comportamento do fogo com uma frequência correspondente ao número de polígonos de progressão existentes, conferindo uma maior granularidade temporal à análise. Do anexo 8 – 1 ao anexo 8 – 7 ilustram-se os mapas de progressão (informação derivada da PT-FireSprd) de cada um dos incêndios considerados como casos de estudo.

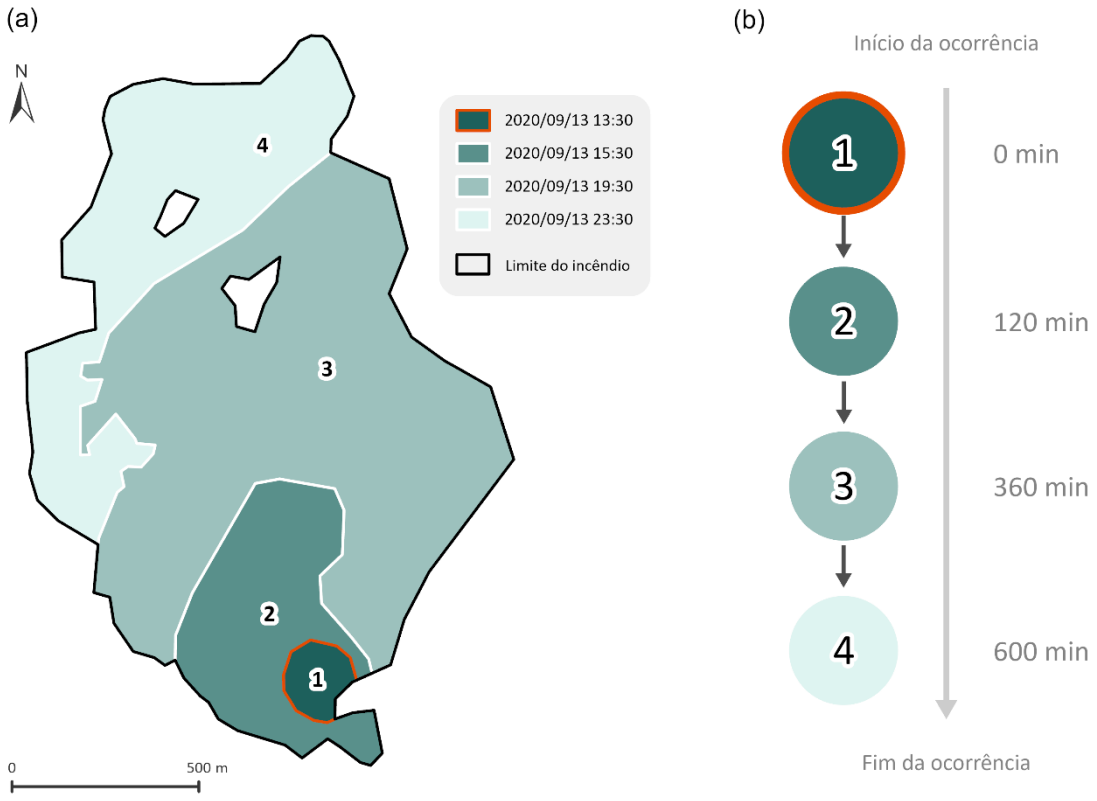


Figura 8 - Progressão de incêndio na forma de a) mapa e b) grafo

3.3.2 Automatização da identificação e caracterização das interseções

Com o intuito de estruturar todas as etapas necessárias à identificação e caracterização das interseções, iterando individualmente por cada caso de estudo, foi desenvolvida uma automatização concebida através de programação *Python*. Desta forma garante-se que os resultados são inequivocamente gerados da mesma forma para todos os casos de estudo. O funcionamento do programa divide-se em cinco momentos: i) carregamento de módulos e bibliotecas; ii) pré-processamento do mapa de combustíveis; iii) pré-processamento do modelo digital de terreno; iv) trajeto provável do fogo e interação com a RPFGC e v) carregamento de dados e execução. Através do anexo 9 ilustra-se o fluxograma de execução onde se fazem representar estas cinco etapas, inseridas ao longo da iteração sobre os sete casos de estudo.

A etapa afeta à determinação do trajeto provável do fogo e interação com a

RPFGC pode ser considerada como a etapa mais importante para investigação da eficácia, considerando que é através desta análise que se clarifica onde e em que condições é que o incêndio foi contido ou transpôs a RPFGC. No seio desta função faz-se uso do grafo explicativo da progressão do incêndio, implementando a iteração ao longo dos polígonos de progressão. De forma específica considera-se que o fogo evolui espacialmente a partir de um polígono identificado como zona de chama ativa, destinando-se a todos os outros polígonos originados a partir dessa mesma zona de chama ativa. No mapa da figura 8 a zona de chama ativa corresponde ao P1, assinalado com perímetro a cor de laranja. A continuidade do incêndio é garantida pela fronteira estabelecida entre o polígono antecedente e o polígono procedente, considerando sempre a ordem dos nós estabelecida pelo grafo explicativo da progressão (e.g., linha de chamas da fronteira de P2 destina-se de forma intransigível para a fronteira de P3).

3.3.3 Modelação do trajeto provável do fogo

A modelação do trajeto provável do fogo integra-se como uma forma de mapear a propagação ao longo da área impactada pelo incêndio, derivando posteriormente os locais onde este interage com a RPFGC. Fazendo recurso aos polígonos de progressão, replicou-se o método implementado por Benali et al. (2023) para definir trajetos que representam uma estimativa acerca do caminho percorrido pelo fogo entre dois pontos conhecidos (origem e destino do fogo).

Os trajetos são calculados iterativamente para cada polígono de progressão, estabelecendo-se uma sequência de passos para que tal seja possível (representado no anexo 9). Em primeiro lugar é calculado um mosaico regular em formato vetorial onde cada quadrícula possui 500 m^2, cobrindo a totalidade da área estabelecida pelos polígonos de progressão. Desta malha extraem-se os centroides de cada quadrícula, locais únicos que servirão posteriormente a formalização de uma rede. Consequentemente, para cada polígono de progressão, são derivados os pontos de início e de fim, correspondendo à origem e destinos possíveis de cada trajeto. Os pontos de origem são definidos com um espaçamento regular de 50 m, sobrepostos

ao limite estabelecido pelo polígono de progressão anterior nos locais em que este coincide com o limite do polígono em análise. Os pontos de destino são definidos com sobreposição ao limite do polígono em análise, nos segmentos em que este não coincide com o polígono de progressão anterior. Estes definem-se de igual forma com espaçamento regular de 50 m. O posicionamento dos centroides do mosaico regular, dos pontos de origem e dos pontos de destino é exemplificado na figura 9 (a) para o P3.

Uma vez definidas as três tipologias de pontos, procede-se à formalização de uma rede implementada através do módulo *Network Analyst* do *ArcPy.* Uma rede caracteriza-se pela conectividade estabelecida entre dois elementos: nós e arcos. Os nós da rede que aqui se formaliza para determinar o trajeto do fogo dizem respeito aos pontos de origem, aos pontos de destino e aos centroides do mosaico regular. Os arcos da rede, neste caso específico, são múltiplos segmentos de reta que conectam os nós tendo por base a sua proximidade. Para determinar estes arcos procedeu-se ao cálculo de uma matriz de distâncias, a qual serve para identificar os 100 vizinhos mais próximos de cada nó integrado na progressão em análise. Para o cálculo da matriz parametriza-se ainda que os pontos de origem e de destino não deverão servir como vizinhos dentro da sua própria tipologia. Desta forma é criada uma rede que visualmente se assemelha à geometria da conjugação de múltiplas teias de aranha, havendo sobreposição de segmentos que se fazem orientar em múltiplas direções, encontrando-se em locais concêntricos. A elevada densidade de arcos definidos entre os nós justifica-se pela necessidade de garantir uma grande quantidade de caminhos possíveis para estimar a deslocação do fogo, permitindo que o mesmo possa alterar o seu rumo com grande especificidade ao longo do trajeto. Na figura 9 (b) demonstra-se a rede formalizada para a análise do P3, destacando-se o detalhe dos arcos que apenas é percetível em grande escala.

Após a formalização da rede para o polígono de progressão em análise, definem-se os parâmetros para a aplicação do algoritmo *closest facility*, também implementado pelo módulo N*etwork Analyst* do *ArcPy*. O algoritmo *closest facility* é habitualmente empregue para resolver problemas de proximidade entre múltiplos incidentes e

instalações, evidenciando a instalação que melhor serve um incidente tendo por base o caminho mais curto identificado. Para determinar este caminho, o algoritmo *closest facility* necessita de três *inputs*: os possíveis locais de destino *(facilities)*, os locais de origem *(incident)* e a rede a partir do qual é possível calcular o trajeto mais curto. Para o presente desafio, considera-se que este algoritmo serve o propósito de encontrar o trajeto mais curto entre um único ponto de destino do fogo *(incident)* e os pontos de origem do fogo *(facilities)*, utilizando a rede anteriormente configurada ao longo do polígono de progressão. Especificamente, o algoritmo *closest facility* itera por ponto de destino procurando o ponto de origem que lhe é mais próximo. Durante este processo são avaliadas n distâncias (correspondendo n ao número de pontos de origem) entre o ponto de destino em análise e os pontos de origem. No fim da execução do algoritmo para o polígono de progressão, obter-se-ão tantos trajetos quantos pontos de destino existam, havendo entre si uma correspondência única. O exemplo da estimação dos trejeitos do fogo pelo método descrito encontra-se na figura 9 (c), onde é possível observar 93 trajetos estimados no interior do P3.

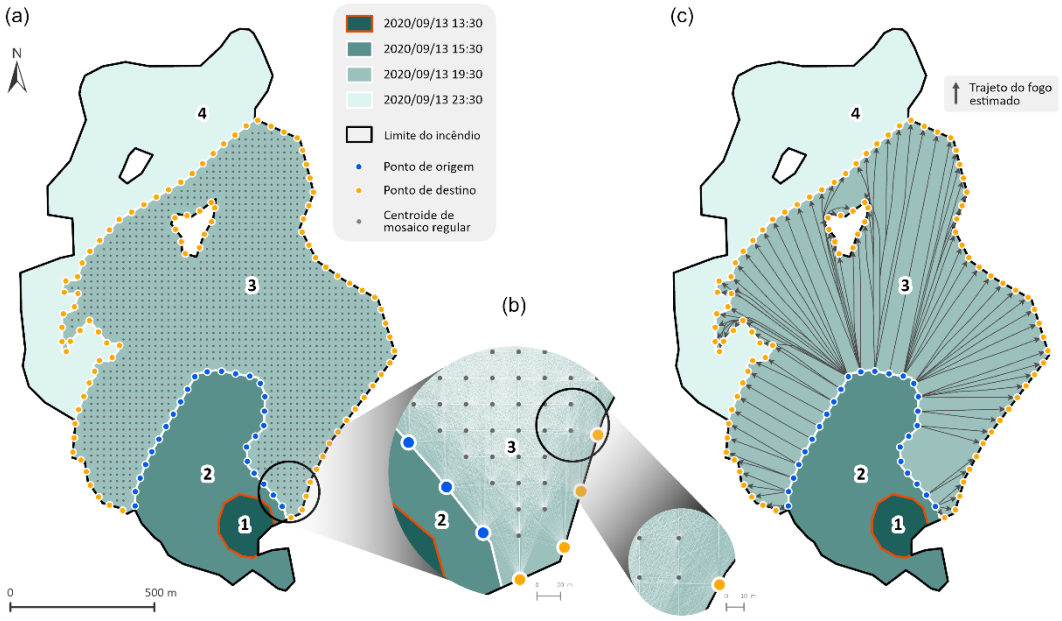


Figura 9 - Processo de determinação do trajeto provável do fogo

3.3.4 Interseção entre o trajeto provável do fogo e os troços da RPFGC

Determina-se que uma interseção consiste no local onde se afere o encontro entre um trajeto do fogo estimado e o limite do troço da RPFGC proximal à origem do fogo. É a partir do levantamento sistemático de interseções para cada um dos casos de estudo que se objetiva concluir sobre o desempenho da RPFGC na contenção destes mesmos incêndios.

Após estimar todos os trajetos do fogo no interior do polígono de progressão, inicia-se a tarefa de triar aqueles que estabelecem relação de sobreposição com os troços de RPFGC. Implementa-se este passo através de uma seleção baseada na localização (função *SelectLayerByLocation_management* do módulo *ArcPy)* onde é parametrizado o *input layer* com os trajetos estimados, o tipo de sobreposição como *intersect* (interseção) e as *select features* com o troço de RPFGC. Após esta triagem é possível diferenciar dois tipos de trajetos do fogo estimados no interior do polígono de progressão: trajetos que se sobrepõem à RPFGC (na figura 10 ilustrados com as setas a azul e cinzento-escuro) e os trajetos que não estabelecem contacto com a mesma (na figura 10 ilustrados com as setas a cinzento-claro). Esta segunda tipologia de trajetos não participa em qualquer outro momento de análise em diante.

Com o objetivo de extrair o ponto em que ocorre a interseção em formato vetorial, fez-se recurso à função *intersect_analysis* do módulo *ArcPy*. Como *input* são fornecidos os trajetos identificados com sobreposição à RPFGC e o próprio troço de RPFGC, definindo-se ainda que o *output* deverá ser apresentado segundo a dimensão pontual. Desta análise resultam dois pontos por trajeto – no caso deste atravessar completamente o troço (ponto de entrada e ponto de saída) – ou um ponto por trajeto – no caso deste possuir o seu fim no interior do troço (verificando-se apenas o ponto de entrada). Para os casos onde se verificam dois pontos por trajeto (entrada e saída do troço), realiza-se uma análise que exclui o ponto de saída, associando o ponto de entrada como a única interseção existente para o trajeto do fogo estimado em consideração.

Obtida uma única interseção por trajeto do fogo estimado entendeu-se a

necessidade de regularizar a frequência das mesmas por polígono de progressão, mantendo a sua representatividade proporcional à área de RPFGC sobreposta ao polígono em análise. Desta forma evita-se a ocasional elevada densidade de interseções em locais muito próximos, as quais poderiam enviesar a amostragem e a consequente análise das variáveis independentes utilizadas para modelar a eficácia. Para tal estabeleceu-se que por cada hectare de RPFGC com sobreposição ao polígono de progressão deveria ser considerada uma interseção. Por exemplo, um polígono que integra cinco hectares de RPFGC deverá possuir cinco interseções. Neste sentido aplicou-se, por polígono de progressão, o algoritmo de *clustering* hierárquico a fim de diferenciar n aglomerados de interseções. Uma vez agrupadas, considerou-se válida a interseção derivada a partir do trajeto de fogo estimado com o maior comprimento dentro do grupo, por forma a evitar a subestimação da velocidade de propagação e consequentemente a intensidade da frente de chamas. Na figura 10 ilustra-se o resultado da aplicação do algoritmo de *clustering* hierárquico, onde as interseções consideradas se fazem representar pelos símbolos circulares azuis, contrastando com as interseções não consideradas representadas pelos símbolos circulares a cinzento-escuro.

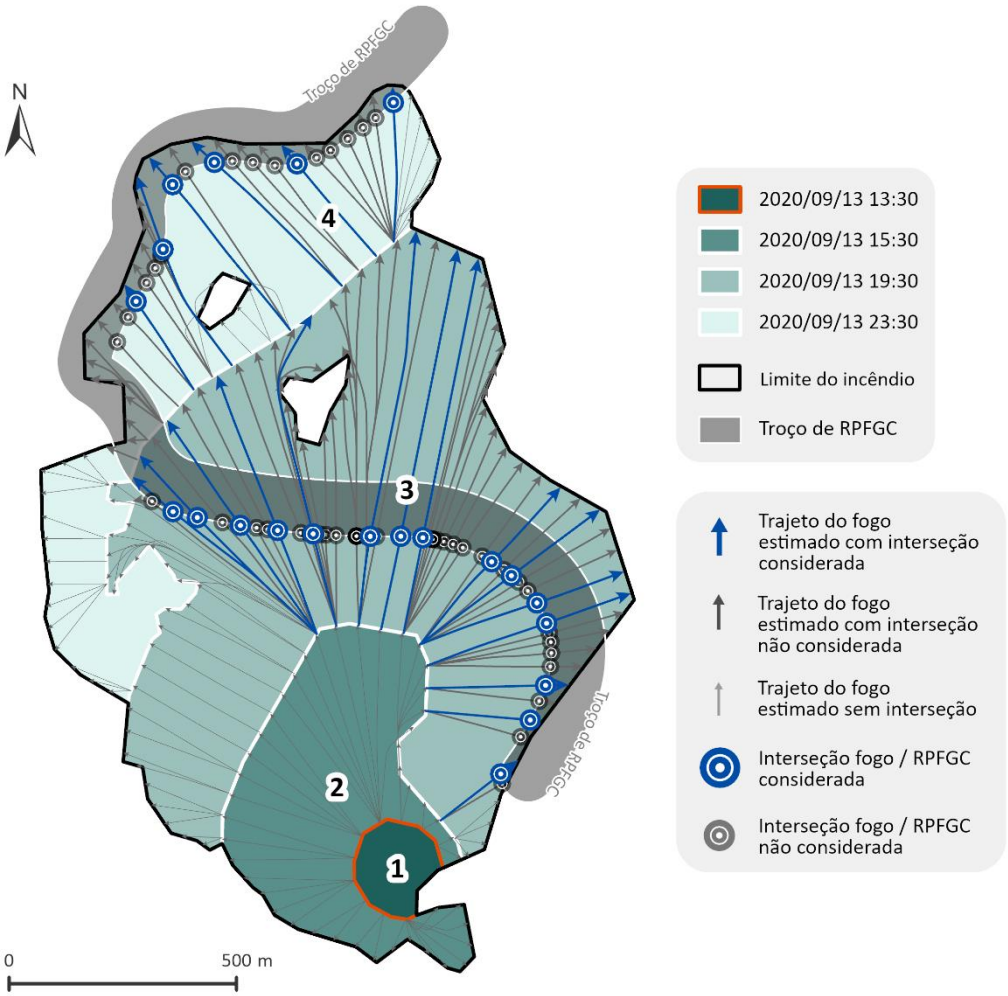


Figura 10 – Mapa de identificação de interseções entre o trajeto provável do fogo e o troço de RPFGC

3.3.5 Eficácia verificada da RPFGC na contenção do incêndio

A eficácia verificada – variável dependente binária considerada neste trabalho – é também aferida nesta fase da metodologia. Para cada interseção considerada no passo anterior procura-se agora classificar se o fogo, ao cruzar o troço de RPFGC naquela posição geográfica, foi contido ou não (interseção eficaz vs interseção não eficaz). Esta análise realiza-se iterativamente por polígono de progressão, procurando inicialmente esclarecer em que local termina o trajeto de fogo estimado que dá origem à interseção. Neste aspeto interessa apurar duas situações particulares: se i) o fim do

trajeto se localiza no interior do troço, coincidindo simultaneamente com o perímetro final do incêndio ou se ii) o fim do trajeto não coincide com o perímetro final do incêndio (independentemente de terminar no interior do troço). Para a primeira situação dita-se que a RPFGC se demonstra eficaz na contenção da propagação do fogo; na segunda situação considera-se que a RPFGC não foi eficaz.

Para completar esta tarefa foi analisada a posição de cada ponto de destino, que se vincula ao trajeto do fogo estimado por meio de uma chave-primária armazenada na sua tabela de atributos. A função *SpatialJoin_analysis* do módulo *ArcPy* foi crucial para que se pudesse cruzar informação alfanumérica entre os trajetos, pontos de destino, polígonos de progressão e troços de RPFGC, considerando sempre a relação topológica entre estas camadas vetoriais. Por exemplo, se o ponto de destino estabelecer contacto com apenas um polígono de progressão significa que está localizado no perímetro final do incêndio; se a este facto se adicionar a hipótese de se localizar no interior do troço de RPFGC, significa que o trajeto que termina neste ponto representa um caminho tomado pelo fogo que foi detido ao intersetar o troço, cessando definitivamente a progressão do incêndio naquele local. Após a execução desta análise ao longo de todos os polígonos de progressão, todas as interseções são rotuladas como eficazes ou não eficazes. Na figura 11 demonstra-se esta verificação automática da eficácia da RPFGC, estando representadas com o símbolo circular verde as interseções eficazes e com o símbolo circular vermelho as interseções não eficazes.

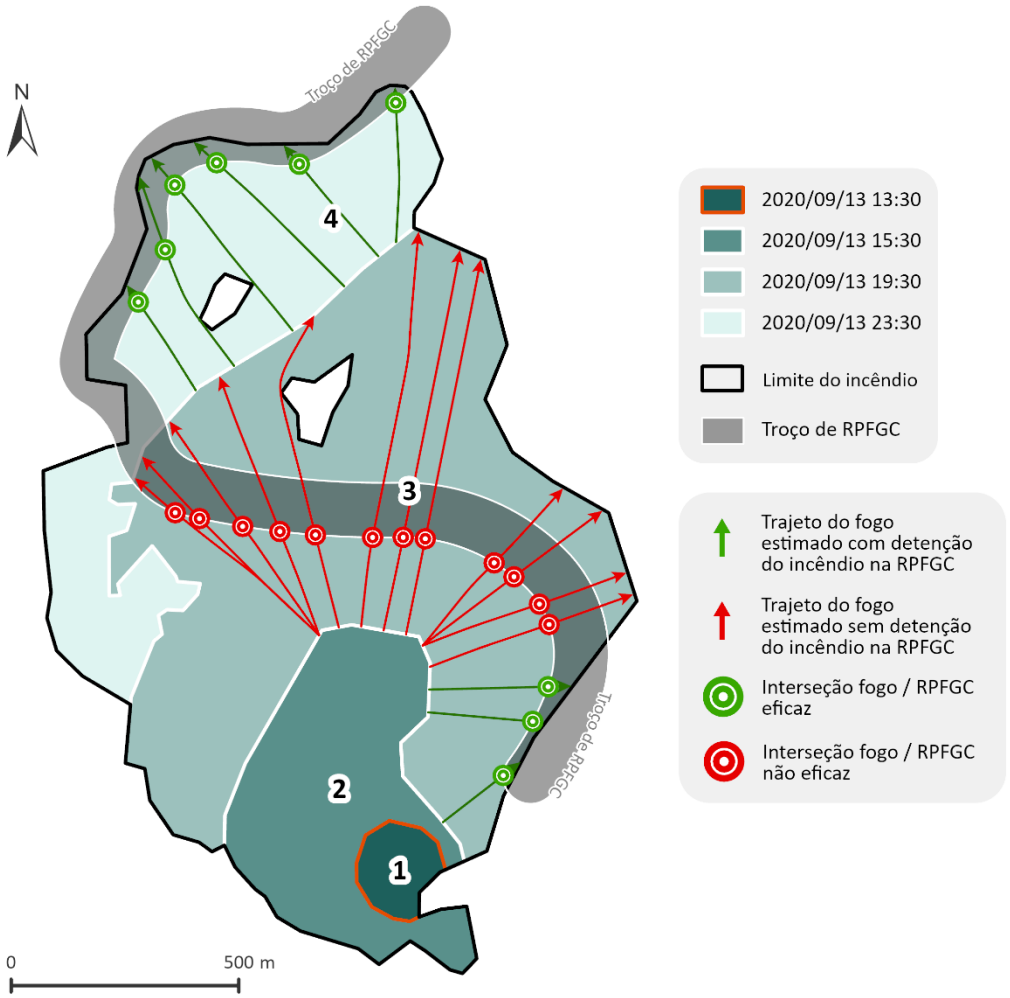


Figura 11 – Mapa de verificação da eficácia nas interseções entre o fogo e o troço de RPFGC

3.3.6 Caracterização das interseções

Com o objetivo de explorar a influência de múltiplas características na eficácia verificada da RPFGC, promove-se nesta instância a clarificação das variáveis independentes utilizadas (tabela 3), bem como a forma com que cada uma é amostrada nas interseções. Definida a localização (ponto 3.3.4) e a eficácia (ponto 3.3.5) de cada interseção no interior dos polígonos de progressão, servem as mesmas para reunir informação acerca do comportamento do fogo, do estado e relação estabelecida com a RPFGC, do relevo e dos índices meteorológicos de incêndio.

Tabela 3 – Variáveis independentes consideradas na modelação da eficácia da RPFGC

Natureza da variável	Nome da variável	Unidade de medida	Resumo
Comportamento estimado do fogo	Velocidade de propagação	Metros por segundo	Velocidade com que o fogo se desloca entre dois pontos, considerando a influência de fatores como o vento, os combustíveis e o terreno.
	Intensidade da frente de chamas	Quilowatt por metro	Quantidade de energia libertada por segundo num metro da frente de chamas.
	Direção de propagação	Graus	Rumo assumido pelo fogo durante a sua propagação, determinado por fatores como o vento, declive ou a distribuição dos combustíveis.
	Diferença em relação à direção de propagação	Graus	Diferença angular em relação à direção de propagação principal assumida pela cabeça do incêndio.
RPFGC	Ângulo de entrada do fogo na RPFGC	Graus	Medida angular que determina o alinhamento do contacto do fogo com o troço de RPFGC.
	Idade da intervenção na RPFGC	Anos	Período avaliado entre a última intervenção silvícola ocorrida na RPFGC e a data da ocorrência do incêndio.
Relevo	Declive	Graus	Inclinação da superfície terrestre.
	Exposição	Graus	Orientação das vertentes da superfície terrestre.
Meteorologia de incêndio	*Fire Weather Index* (FWI)	n.a.	Representa a intensidade da frente de fogo, definida como a libertação de energia por unidade de comprimento da frente de chamas.
	Build Up Index (BUI)	n.a.	Representa a carga de combustível disponível para a combustão.
	Initial Spread Index (ISI)	n.a.	Representa a velocidade inicial de progressão do fogo.
	Drought Code (DC)	n.a.	Representa o teor de humidade dos combustíveis grossos (25kg/m^2) mortos entre 10 a 20 cm de profundidade.
	Duff Moisture Code (DMC)	n.a.	Representa o teor de humidade dos combustíveis médios mortos (5kg/m^2) na camada entre 5 a 10 cm de profundidade.
	Fine Fuel Moisture Content (FFMC)	n.a.	Representa o teor de humidade dos combustíveis finos (0.25kg/m2) mortos na camada superficial até 2 cm de profundidade e reflete as condições meteorológicas nos últimos 2 a 3 dias.

A primeira variável relativa ao comportamento estimado do fogo é a velocidade de propagação que se define como o avanço linear da frente de chamas por unidade de tempo (Rego et al., 2021), optando-se neste trabalho utilizar a unidade de medida expressa em metros por segundo. Para calcular a velocidade de propagação adota-se a seguinte fórmula:

$$R = \frac{D}{T} = \frac{P2 - P1}{T2 - T1}$$

onde R diz respeito à velocidade de propagação, calculada através da divisão da distância percorrida pelo fogo entre dois pontos observados (D, em metros) pelo tempo decorrido entre essas observações (T, em segundos). Na fórmula, P2 indica a localização de um ponto de destino, enquanto P1 indica a localização do ponto de origem correspondente. A distância entre os dois é avaliada segundo o comprimento do trajeto do fogo estimado que liga P1 a P2, ressalvando que esta distância é medida sobre o terreno e não representa uma distância euclidiana. A diferença entre T2 e T1 remete para o tempo decorrido no polígono de progressão em análise. Reforça-se que a velocidade de propagação resulta num valor estimado, constante ao longo do trajeto do fogo considerado. Na realidade é sabido que esta velocidade é dinâmica, dependendo de um inúmero conjunto de fatores que variam ao longo do caminho percorrido pelo fogo. Na figura 12 ilustra-se a velocidade de propagação estimada para cada trajeto do fogo com interseção ao troço de RPFGC no P3 e P4.

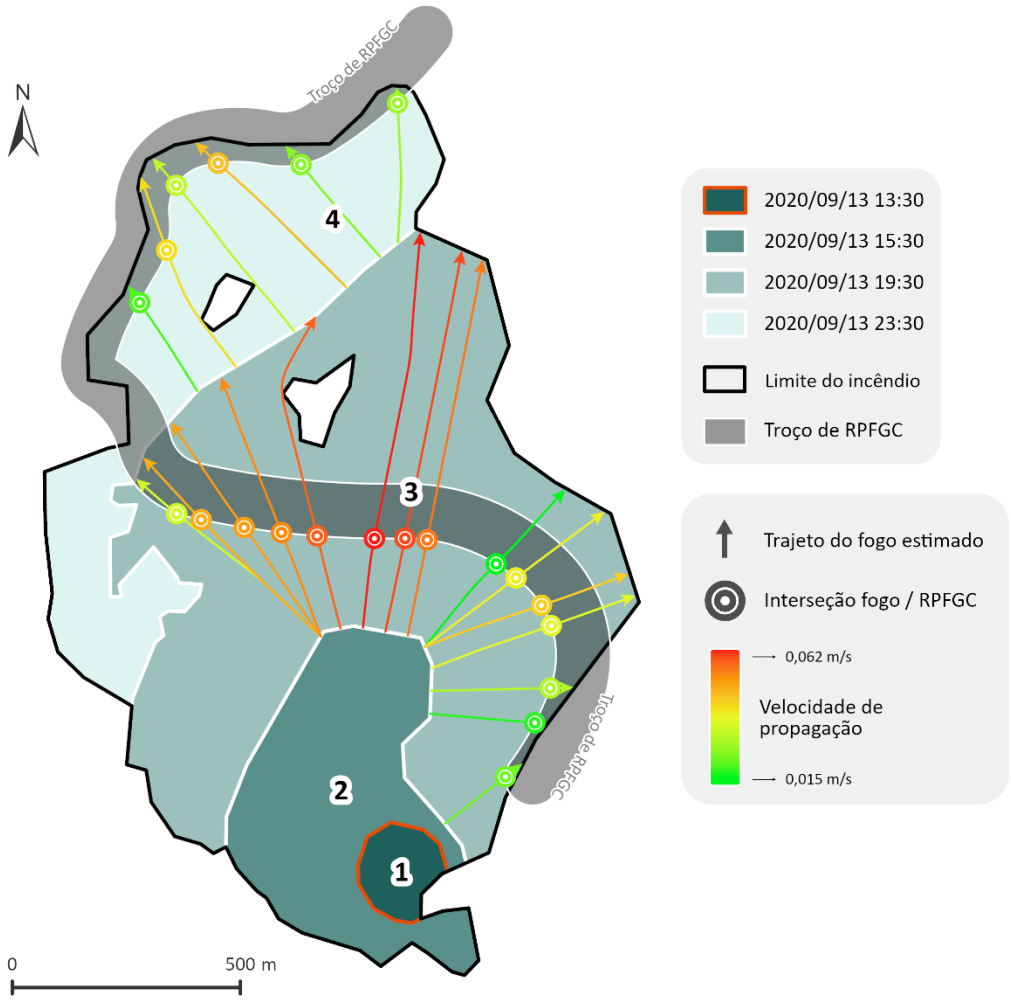


Figura 12 – Mapa da velocidade de propagação estimada em cada interseção entre o fogo e o troço de RPFGC

A segunda variável descritora do comportamento estimado do fogo é a intensidade da frente de chamas que se define como a proporção de energia libertada por unidade de tempo e unidade de comprimento da frente de chamas, sendo uma métrica utilizada para caracterizar a combustão da vegetação durante um incêndio. A estimativa da intensidade da frente de chamas foi formulada por Byram (1959) e expressa-se em quilowatt por metro e calcula-se da seguinte forma:

$$I_B = H \,.\, w \,.\, R$$

Descrita pela equação, a intensidade da frente de chamas (I_B) corresponde ao produto do poder calorífico do combustível (H, introduzido em kJ/kg), da carga de combustível (w, em kg/m^2) e da velocidade de propagação (R, em m/s). A intensidade da frente de chamas tem grande importância no contexto operacional uma vez que é utilizada como *proxy* na estimação da capacidade de controlo e na determinação das técnicas de combate a adotar (Finney et al., 2021). Para calcular a intensidade da frente de chamas em cada interseção é utilizado o mapa de combustíveis (Sá et al., 2023) que integra os 18 modelos propostos por Fernandes et al. (2009) (anexo 10) e a tabela com os respetivos parâmetros (anexo 11). Por forma a compreender a dinâmica da intensidade da frente de chamas a montante da interseção do fogo com a rede primária, definiram-se pontos a 100 m, 500 m e 1 000 m da interseção (quando o comprimento do trajeto do fogo estimado o permite). O cálculo da intensidade da frente de chamas para estes locais secundários serve para compreender o potencial do fogo no trajeto em consideração, associando-o por exemplo, a várias tipologias de propagação que poderão ter influência na eficácia da RPFGC.

Na figura 13 ilustra-se o cálculo da intensidade estimada da frente de chamas nas interseções do P3 e P4 do incêndio representado. Nesta figura é visível ainda os quatro modelos de combustível identificados nas interseções, sendo eles M-EUC (folhada de eucalipto com sub-bosque arbustivo), V-MAa (mato alto [>1 m] com bastante combustível morto e/ou fino), V-MH (mato baixo [< 1 m] e verde, frequentemente descontínuo e com herbáceas) e V-MMa (mato alto [>1 m] com pouco combustível morto e/ou com folhagem relativamente grosseira).

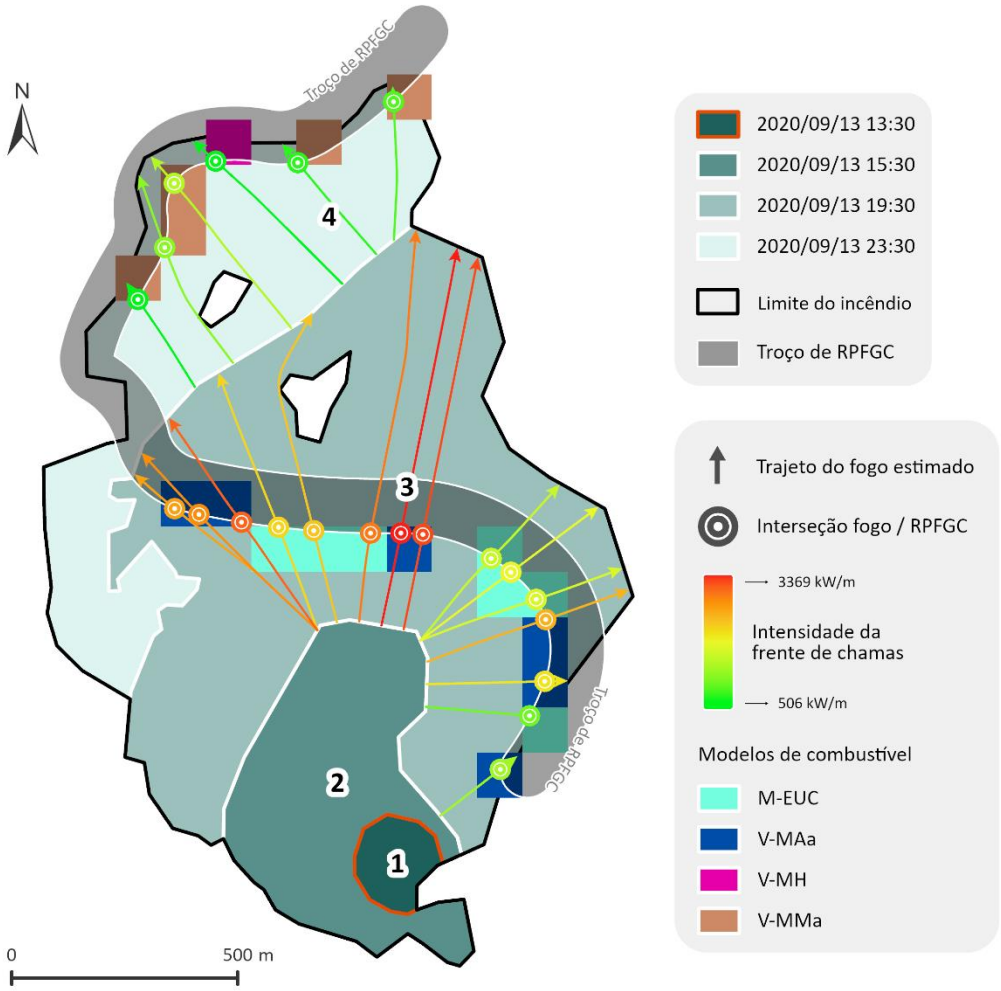


Figura 13 – Mapa da intensidade da frente de chamas estimada em cada interseção entre o fogo e o troço de RPFGC

A terceira variável integrada no grupo de descritores de comportamento estimado do fogo diz respeito à avaliação da direção de propagação. Esta variável é incluída com o objetivo de identificar, para cada interseção, a direção (em relação ao norte) em que o fogo se desloca. O cálculo da direção de propagação assenta no apuramento da propriedade geométrica *line bearing* de cada trajeto do fogo estimado, consequentemente associada à respetiva interseção por meio de chave primária. A propriedade geométrica *line bearing* é adquirida através da função *AddGeometryAttributes_management,* servindo-se da coordenada do ponto de origem e de destino do trajeto para calcular a sua orientação em relação ao norte. A

direção de propagação principal (que define a localização da cabeça do incêndio) é determinada pelo trajeto de fogo estimado - no interior do polígono de progressão - onde a velocidade de propagação é mais elevada (Benali et al., 2023).

A quarta e última variável incluída no grupo de descritores de comportamento estimado do fogo é a diferença em relação à direção de propagação. O comportamento do fogo é dinâmico ao longo da linha de chamas, havendo locais onde o fogo se desloca com maior velocidade e maior intensidade (como é exemplo a cabeça do incêndio) e locais onde estas variáveis não são tão proeminentes (flancos e retaguarda) (Finney et al., 2021). Avaliando a diferença angular de cada trajeto do fogo estimado em relação ao eixo de propagação principal (trajeto estimado com maior velocidade de propagação) pretende-se entender o nível de proximidade ao local onde se estima que a frente de chamas tenha lavrado com maior intensidade. Especificamente, uma interseção com o valor próximo de 0º nesta variável indica que a mesma foi originada por um trajeto que se alinha com a direção de propagação principal; uma interseção com o valor próximo de 90º indica que a mesma poderá integrar um flanco (esquerdo ou direito); uma interseção com o valor próximo de 180º indica que a mesma foi originada por um trajeto estimado com proximidade à retaguarda do incêndio.

A variável independente "ângulo de entrada do fogo na RPFGC" é incluída por forma a descrever a geometria associada à interseção dos trajetos do fogo com o troço de RPFGC. Considerando que os troços de RPFGC são executados com a largura padrão de 125 m em toda a sua extensão, a eficácia desta descontinuidade poderá variar em função do ângulo de interseção do incêndio com a mesma. Por exemplo, se houver uma interseção perpendicular (90º) a distância que o fogo terá de percorrer para alcançar o limite posterior do troço será de 125 m – ilustrada na figura 14 pelos trajetos a cinzento; por oposição, uma interseção de 22,5º (quase paralela ao troço) pode levar a que o fogo necessite de percorrer aproximadamente 370 m para alcançar o limite posterior da descontinuidade – ilustrado na figura 14 pelos trajetos a laranja.

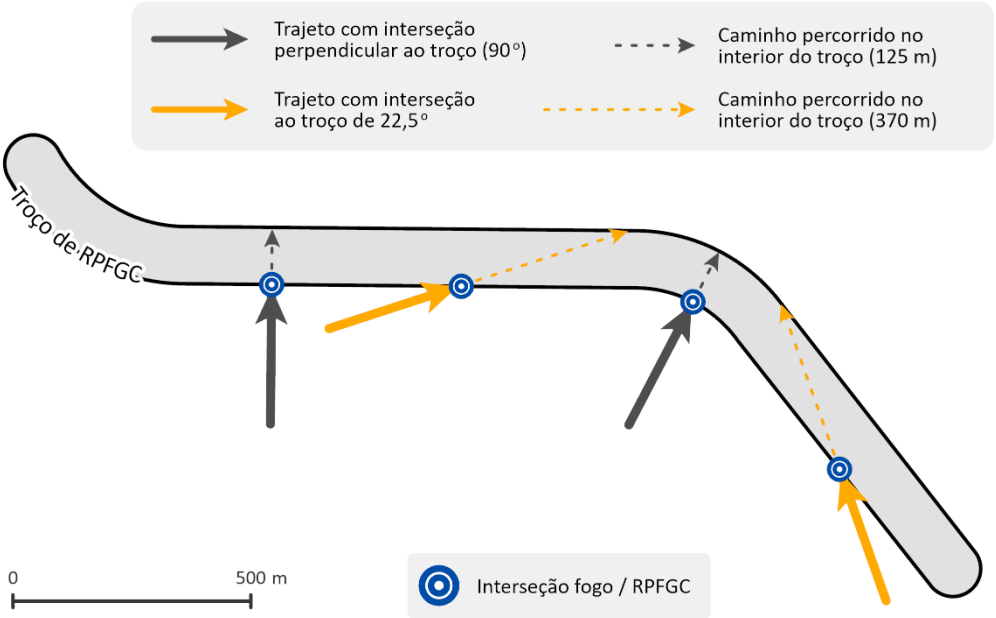


Figura 14 – Distância percorrida pelo fogo no interior de um troço de RPFGC em função do ângulo de entrada do trajeto estimado do fogo

A idade da intervenção na RPFGC é integrada como uma variável que estabelece um *proxy* ao estado da vegetação no interior dos troços, por forma a caracterizar o grau de descontinuidade existente no momento do incêndio. Assume-se que quanto mais recente for a intervenção, maior será a descontinuidade proporcionada. A informação de base sobre esta variável é disponibilizada nos dados vetoriais da RPFGC executada, a qual integra um campo na sua tabela de atributos com o ano da intervenção mais recente no troço. Para obter a idade da intervenção no troço à data do incêndio é subtraído o ano da intervenção pelo ano em que o incêndio ocorreu, expressando-se esta diferença em anos.

Dentro do grupo de variáveis que procuram caracterizar as condições do relevo no qual as interseções se localizam, inicia-se pelo enquadramento da variável afeta ao declive. O declive demonstra impacto na determinação da direção de progressão do incêndio, contribuindo para o pré-aquecimento dos combustíveis que se localizam acima da cota da frente de chamas (Shennan et al., 2023). Para determinar o declive em cada uma das interseções fez-se recurso à superfície matricial de declives (dado

intermédio derivado do modelo digital de terreno). Por polígono de progressão foi implementada a função *ExtractValuesToPoints* do módulo *ArcPy*, onde eram fornecidos como *inputs* as interseções e a superfície matricial de declives. O declive foi calculado em graus e consequentemente dividido em seis classes: entre 0º e 5º, considerado plano; entre 5º e 10º, suave; entre 10 º e 15º, moderado; entre 15º e 25º, inclinado; entre 25º e 35º, muito inclinado e declives superiores a 35º, extremamente inclinados. Na figura 15 demonstra-se a estratégia de aquisição do valor do declive para as interseções pertencentes ao P3 e P4. Em anteposição às interseções e aos trajetos figura-se um estrato da superfície matricial de declives, que neste caso varia entre 1º e 17º.

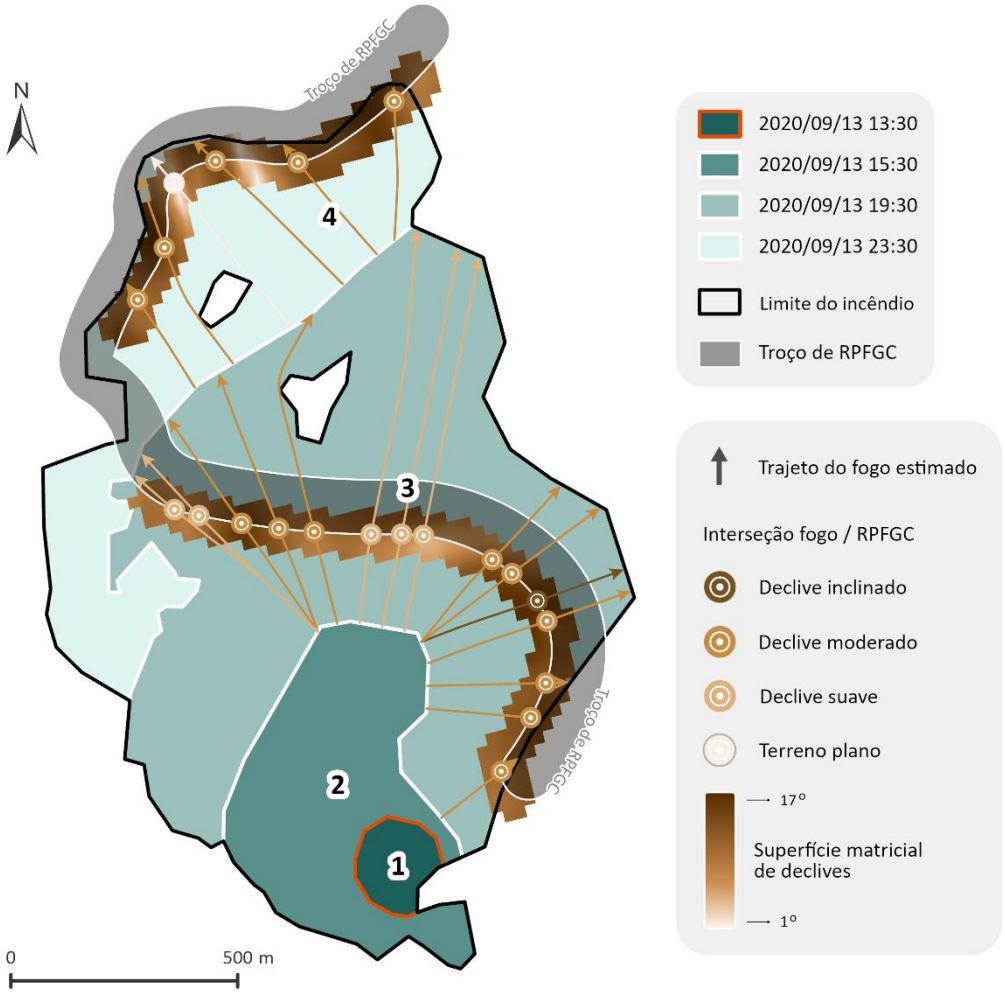


Figura 15 – Mapa do declive em cada interseção entre o fogo e o troço de RPFGC

Também a variável que retrata a exposição das vertentes é considerada como descritora das condições orográficas. À semelhança do declive, a importância desta variável reflete-se no comportamento do fogo, nomeadamente na diferenciação do número de horas de sol incidentes sobre encostas com diferentes orientações, fazendo variar a disponibilidade, as espécies e a humidade dos combustíveis. Para aquisição da exposição da vertente em cada uma das interseções procedeu-se exatamente como descrito para o declive, substituindo a superfície matricial de declive pela superfície matricial de exposições das vertentes (também esta um dado intermédio derivado do modelo digital de terreno). Na figura 16 demonstra-se a análise da exposição das vertentes e a consequente associação dessa informação às interseções identificadas no P3 e P4.

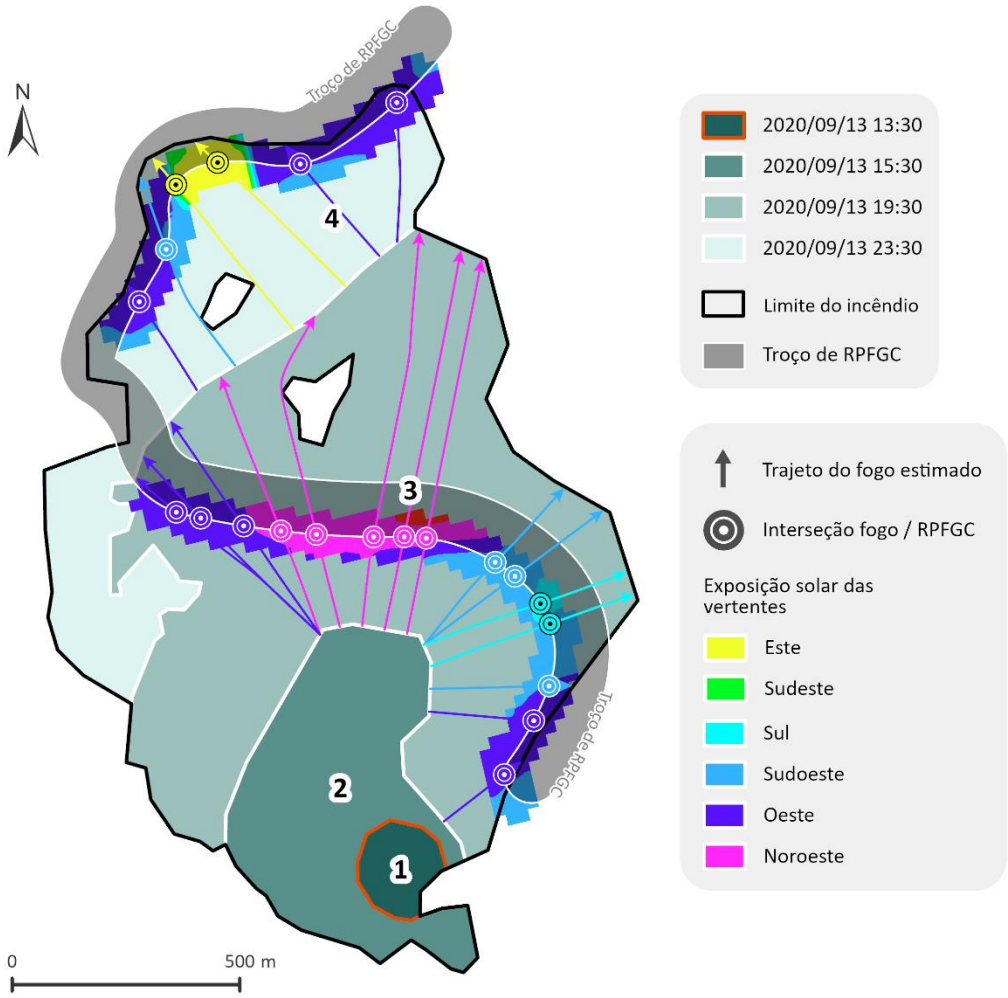


Figura 16 – Mapa da exposição solar da vertente em cada interseção entre o fogo e o troço de RPFGC

O último grupo de variáveis caracterizadoras da relação estabelecida entre os trajetos do fogo estimados e a RPFGC diz respeito à meteorologia de incêndio. O FWI é um índice amplamente adotado internacionalmente, servindo como forma de prever o comportamento do fogo através da observação de quatro componentes meteorológicas: temperatura a 2m, humidade relativa a 2m, vento a 10m e precipitação a 24h. Os sub-índices (utilizados para cálculo do FWI) DC, DMC e FFMC indicam a secura dos combustíveis à superfície, o ISI informa diretamente sobre a velocidade inicial de propagação expectável, o BUI remete para a disponibilidade de combustíveis existentes para a combustão e o índice FWI informa acerca da

intensidade frontal do fogo (IPMA, s.d.). Importante será referir que i) o cálculo diário do FWI é realizado com os dados meteorológicos observados pelas 14h (incorrendo na possibilidade de subestimar, por exemplo, o valor máximo de temperatura ou o valor mínimo de humidade relativa observado durante o referido dia); ii) a resolução espacial desta informação é francamente mais grosseira comparativamente às restantes variáveis independentes consideradas.

Para associar o FWI e respetivos sub-índices às interseções procedeu-se: i) à exploração do NetCDF descarregado para o dia coincidente com a data-hora do polígono de progressão em análise; ii) extração a partir do NetCDF de uma superfície matricial por índice e sub-índices meteorológicos e iii) implementação da função *ExtractValuesToPoints* do módulo *ArcPy* para associar o valor do pixel de cada superfície matricial às interseções identificadas no polígono de progressão em análise. Para analisar os índices meteorológicos de um incêndio que teve a duração de cinco dias, seriam necessários cinco ficheiros NetCDF, os quais integrariam no total 30 superfícies matriciais distintas (resultado de cinco dias multiplicados por seis índices /sub-índices meteorológicos).

Para melhor compreensão e adoção do FWI, determinam-se classes de perigo às quais são associadas as tipologias de incêndios possíveis de ocorrer. Na tabela do anexo 12 faz-se a correspondência entre os valores do índice FWI, as classes de perigo e as tipologias de incêndio.

3.4 Avaliação da eficácia da RPFGC

A avaliação da eficácia inicia-se após a identificação e caracterização das interseções ao longo dos sete casos de estudo (processo demonstrado no fluxograma do anexo 9). Descrevem-se agora nesta etapa os passos realizados para a congregação e análise do conjunto de dados final, a partir do qual se extraíram as conclusões acerca da eficácia da RPFGC na contenção dos incêndios considerados.

Terminada a execução da automação, é depositada na *geodatabase* individual afeta a cada caso de estudo uma camada vetorial que integra as interseções

caracterizadas. Para levar a cabo uma análise integrada foi necessário fundir os dados alfanuméricos de todas os casos de estudo, reunindo desta forma uma tabela de atributos única. Para executar esta tarefa recorreu-se à função *Merge_management* do módulo *ArcPy.* Previamente à execução de qualquer tipo de análises, procedeu-se à validação do conjunto de dados final. Desta forma comprova-se a veracidade da informação associada às interceções, despistando-se possíveis erros na aquisição automática. Determinou-se um rácio de uma interseção validada por cada 100 identificadas, confrontando-se os valores automaticamente adquiridos para cada uma das variáveis consideradas. Terminada a validação, não foram identificadas incongruências resultantes do processo de caracterização automático.

Por forma a apurar a eficácia da RPFGC em cada acaso de estudo, é realizada a divisão entre as interseções eficazes e o total de interseções identificadas; para apurar a eficácia total da RPFGC é realizada a divisão entre a totalidade de interseções identificadas ao longo dos sete casos de estudo e a totalidade de interseções identificadas no mesmo conjunto de dados.

3.4.1 Desenvolvimento da análise exploratória

Para derivar conclusões acerca da eficácia, implementou-se numa primeira fase uma etapa de análise exploratória. O objetivo da análise exploratória resume-se à necessidade de investigar as principais características associadas à eficácia ao longo das múltiplas variáveis em análise (variáveis independentes) fazendo simultaneamente um paralelismo com a variável dependente – eficácia verificada. Neste sentido, foi desenvolvido um *notebook Jupyter* com *scripts* em *Python que serviu* como "laboratório de dados" para a extração de informação e produção de figuras de forma sistemática.

A ausência de pré-processamento justifica-se pela intenção de capturar a essência do conjunto de dados, fornecendo informação para uma discussão fundamentada. Das 14 variáveis analisam-se oito de forma exploratória, as quais relativas ao comportamento estimado do fogo, às características da RPFGC e às características do

terreno. As variáveis integradas no grupo da meteorologia de incêndio não são incluídas nesta etapa. Esta decisão justifica-se pela sua baixa variabilidade, entendendo-se ser imprudente relacionar de forma independente os seus valores com a eficácia da RPFGC.

Os resultados desta análise exploratória serão apresentados no ponto 4.1, desenvolvendo-se uma subestrutura para analisar individualmente cada variável.

3.4.2 Desenvolvimento dos modelos de classificação automática da eficácia da RPFGC

A pertinência do desenvolvimento de modelos de classificação automática é justificada por dois motivos: i) pretensão de ordenar a importância das variáveis na classificação da eficácia modelada e ii) comparação do desempenho de diferentes algoritmos de classificação na modelação da eficácia. A implementação dos métodos de classificação automática foram realizados através do *software KNIME Analytics Plataform*.

A primeira fase caracteriza-se pelo pré-processamento do conjunto de dados. Nesta fase procura-se amplificar o sinal a ser modelado, procurando eliminar o ruído dos dados. Especificamente, o pré-processamento é executado em três etapas. A primeira remete para a deteção de *outliers* numéricos ao longo de todas as variáveis numéricas. Esta deteção é parametrizada para detetar valores que se posicionem fora do intervalo estabelecido por R, onde $R = [Q_1 - (1{,}5\ IQR),\ Q_3 + (1{,}5\ IQR)]$. Q_1 corresponde ao primeiro quartil, Q_3 ao terceiro quartil e $IQR = Q_3 - Q_1$. Os *outliers* detetados são reajustados para o limite máximo superior ou inferior estabelecido por R.

Durante a segunda fase do pré-processamento estabelece-se uma normalização dos valores numéricos ao longo de todas as variáveis deste tipo. A normalização foi executada para operar uma transformação linear do tipo mínimo/máximo, onde os valores são reajustados para uma amplitude compreendida entre 0 e 1. A fórmula de transformação é a seguinte:

$$y' = \left(\frac{y - min\ 1}{max1 - min1}\right)(max2 - min2) + min2$$

onde y' corresponde ao valor normalizado, y ao valor original, min1 e max1 o mínimo e máximo da distribuição original da variável em normalização e min2 max2 o mínimo e máximo da escala de normalização.

A última fase do pré-processamento diz respeito à avaliação da correlação entre variáveis independentes. A avaliação da correlação serve para reduzir o espaço de *input* utilizado pelos algoritmos de classificação, identificando pares de variáveis que possam estabelecer entre si uma forte afinidade. A métrica utilizada para avaliar a correlação foi o coeficiente de Pearson, que quantifica a relação entre os pares de variáveis numa escala variável entre -1 (correlação fortemente negativa) e 1 (correlação fortemente positiva). Após obtenção da matriz de correlação onde se inclui todos os pares de variáveis, optou-se por excluir as variáveis que obtinham uma correlação muito forte (coeficiente de Pearson superior a 0,9). Das 14 variáveis independentes consideradas foram excluídas três variáveis do grupo de índices meteorológicos de incêndio, nomeadamente as variáveis DC e DMC e ISI que se correlacionavam de forma distinta com as variáveis FWI e BUI.

Terminado o pré-processamento, evoluiu-se para a implementação dos algoritmos de classificação. Primeiramente houve necessidade de dividir o conjunto de dados pré-processado em duas partições, uma destinada ao treino dos modelos de classificação automática e outra vocacionada para o teste dos mesmos. O particionamento foi executado à proporção 1/4, onde por cada observação de dados utilizada para testar o modelo, quatro foram utilizadas no seu treino. Ou seja, 20% do conjunto de dados foi utilizado para teste enquanto 80% foi utilizado para treino.

Os algoritmos de classificação automática selecionados para este trabalho foram três*: random forest* (RF*), k nearest neighbor* (KNN) e *support vector machine* (SVM). O funcionamento de cada um destes algoritmos assenta sobre particularidades diferentes: RF distingue-se por ser um algoritmo de *ensemble*, desenhado para construir n árvores de decisão e considerar os seus votos individuais para melhorar a exatidão e reduzir o *overfitting* do modelo (KNIME, s.d.-c); KNN é um algoritmo de

funcionamento simples, que opera através da classificação de pontos de dados tendo por base as características das k ocorrências mais próximas no espaço de *input* (KNIME, s.d.-a); SVM é um algoritmo de aprendizagem supervisionada que define um hiperplano ajustado com o objetivo de separar as classes com a maior distância possível. Especificamente transforma os dados num espaço de maior dimensão, definindo vetores de suporte para dividir as fronteiras do hiperplano (KNIME, s.d.-d).

No fim do desenvolvimento dos modelos de classificação da eficácia da RPFGC, avalia-se o desempenho individual de cada algoritmo, procurando avaliar aquele que melhor se adaptou ao conjunto de dados. Este desempenho é avaliado a partir da comparação direta entre a eficácia verificada (variável dependente) e a eficácia modelada a partir das 11 variáveis independentes. Especificamente é construída uma matriz de confusão para classificações binárias composta por quatro componentes: verdadeiros positivos (VP - interseções classificadas como eficazes, onde foi verificada eficácia); verdadeiros negativos (VN - interseções classificadas como não eficazes, onde não foi verificada eficácia); falsos positivos (FP - interseções classificadas como eficazes, onde não foi verificada eficácia) e falsos negativos (FN - interseções classificadas como não eficazes, onde foi verificada eficácia). Como métrica de performance adotou-se a exatidão temática que se formula através das componentes da matriz de confusão:

$$exatidão = \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN}$$

A avaliação da eficácia da RPFGC termina com a determinação da importância das variáveis. Este é um resultado útil para melhor compreender quais os fatores com maior influência na modelação da eficácia. Por motivos de simplificação da metodologia, determinou-se que apenas seria derivada a importância das variáveis para o modelo que devolveu maior exatidão temática. Para realizar esta tarefa integrou-se a componente de *software Global Feature Importance* no *KNIME Analytics Platform*, disponibilizada no site da plataforma em https://www.knime.com/blog/understand-ml-model-global-feature-importance.

Desta componente fez-se uso da métrica *Permutation Feature Importance*, proposta por Breiman (2001). Trata-se de uma técnica de inspeção que mede a contribuição de cada variável para o desempenho estatístico do modelo treinado. Opera iterativamente através da troca aleatória de valores numa variável, observando-se o resultado na degradação progressiva do modelo. A interpretação da *Permutation Feature Importance* depende da métrica de performance em adotada, neste caso a exatidão. Imagine-se uma variável que revela a percentagem de 3% – significa que esta variável, após a permutação dos seus valores, contribuiu para degradação da exatidão do modelo em 3%. No fluxograma do anexo 13 ilustra-se a implementação dos modelos de classificação a partir do *KNIME Analytics Platform,* demonstrando-se cada um dos passos supra relatados.

4 RESULTADOS

A partir da modelação do trajeto do fogo para os sete casos de estudo, identificaram-se no total 1 165 interseções com a RPFGC. A partir da figura 17 (a) relativiza-se a frequência das interceções identificadas em cada caso de estudo pelo total de interseções. Garrocho é o incêndio onde foram amostradas mais interseções (847, representando 72% do total), seguindo-se de Sardeiras de Baixo (103, representando a 9% do total), Conqueiros (100, 9% do total), Carrascal (58, 5% do total), Monchique (22, 2% do total), São Marcos da Serra (20, 2% do total) e Vale de Prazeres (15, 1% do total).

Considerando a eficácia da RPFGC, apura-se que em 227 interseções (19% do total) o incêndio foi contido no troço de RPFGC. Através da figura 17 (b) ilustra-se a percentagem de eficácia face ao total de interseções identificadas em cada caso de estudo, permitindo destacar Monchique como caso de estudo onde a RPFGC demonstrou maior eficácia (82% do total), seguindo-se Vale de Prazeres (80%), Carrascal (28%), Conqueiros (27%), São Marcos da Serra (25%), Garrocho (17%) e Sardeiras de Baixo (1%).

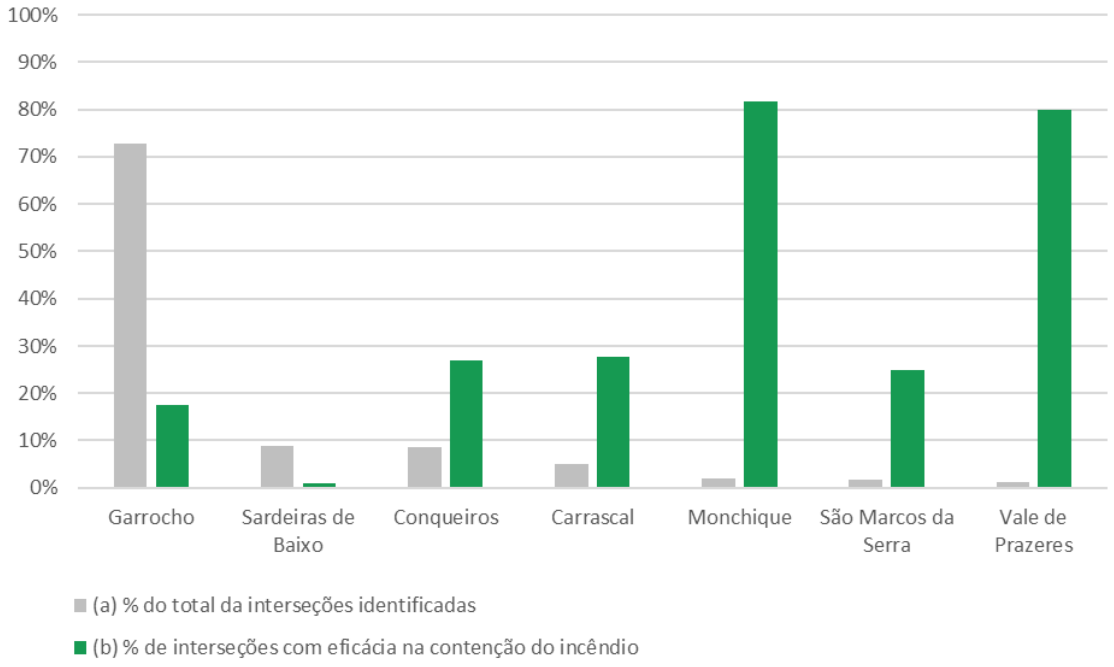


Figura 17 – Percentagem de interseções identificadas e percentagem de interseções com eficácia por caso de estudo

Entre o anexo 14 – 1 e 14 – 7 demonstra-se a cartografia da eficácia da RPFGC verificada em cada um dos casos de estudo. Estes mapas comtemplam todos os trajetos de fogo estimados com interseção aos troços de RPFGC, diferenciando-os entre eficazes (a verde) ou não eficazes (a vermelho) na contenção do incêndio.

4.1 Análise exploratória

4.1.1 Velocidade de propagação

A velocidade de propagação estimada em cada interseção demonstra grande variação ao longo dos casos de estudo. Em valores médios, o fogo intercetou os troços de RPFGC com uma velocidade estimada de 0,21 m/s. Nas interseções em que se verificou a eficácia da RPFGC na contenção do incêndio a média da velocidade do fogo estimada estabeleceu-se nos 0,07 m/s, sendo que nas interceções em que o fogo transpôs o troço de RPFGC este valor fixou-se nos 0,24 m/s.

Por observação da figura 18, a velocidade máxima de propagação estimada no grupo de interceções com eficácia foi identificada no caso de estudo de Garrocho (0,75 m/s). No grupo de análise respeitante às interseções sem verificação de eficácia, a velocidade máxima do fogo estimada estabeleceu-se em 0,64 m/s e a velocidade mínima em 0,01 m/s, ambas as interseções identificadas no incêndio de Garrocho. Entre o anexo 15 - 1 e o anexo 15 - 7 demonstra-se graficamente a variabilidade espacial da velocidade de propagação em cada um dos casos de estudo.

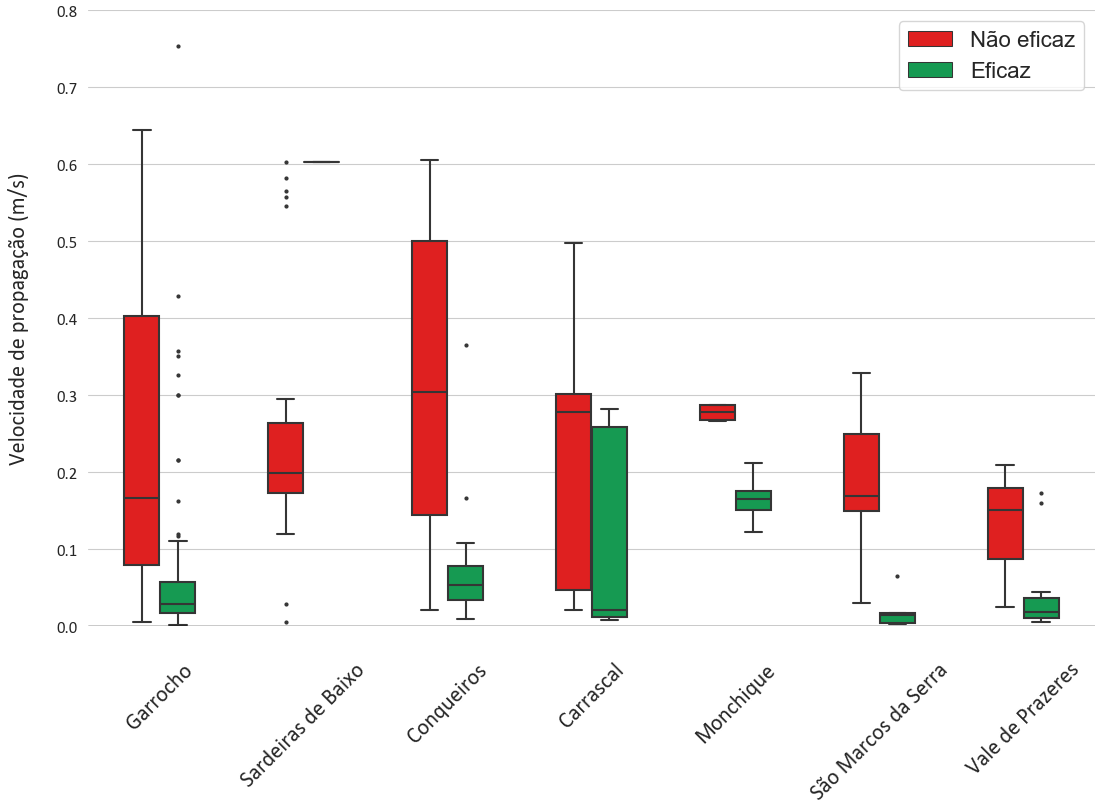


Figura 18 – Distribuição da velocidade de propagação estimada nas interseções, por caso de estudo e por eficácia verificada

4.1.2 Intensidade da frente de chamas

Em média, o fogo intercetou a RPFGC com uma intensidade estimada de 7 618 kW/m. Constata-se que, à medida que o fogo se aproxima do troço de RPFGC, a intensidade estimada da frente de chamas tende a diminuir. Esta tendência é observável no gráfico da figura 19, onde se comparam os valores médios absolutos espelhados para a interseção e para as três distâncias complementares amostradas. A análise pelo prisma da eficácia também salienta diferenças: nos locais onde se verifica a eficácia da RPFGC na detenção do incêndio a intensidade média estimada é de 2 804 kW/m, sendo que nas interseções não eficazes este valor estabelece-se nos 8 780 kW/m; à distância de 100 m da interseção, a intensidade média estimada é de 3 553 kW/m para os trajetos que derivam interseções eficazes, contrastando com 9 133 kW/m estimados nos trajetos onde a eficácia na interseção não se verifica; a 500 m da interseção com a RPFGC, os trajetos que resultam em interseções eficazes têm uma intensidade média estimada de 5 290 kW/m, opondo-se aos 11 088 kW/m estimados para a intensidade média dos trajetos que não se fazem conter na RPFGC; por último, a 1 000 m da RPFGC, a intensidade média dos trajetos que originam eficácia é de 7 136 kW/m, valor inferior aos 13 057 kW/m correspondentes à intensidade média dos trajetos que trespassam a RPFGC. O anexo 16 ilustra quatro gráficos representativos da intensidade da frente de chamas estimada para cada distância amostrada, diferenciando por caso de estudo.

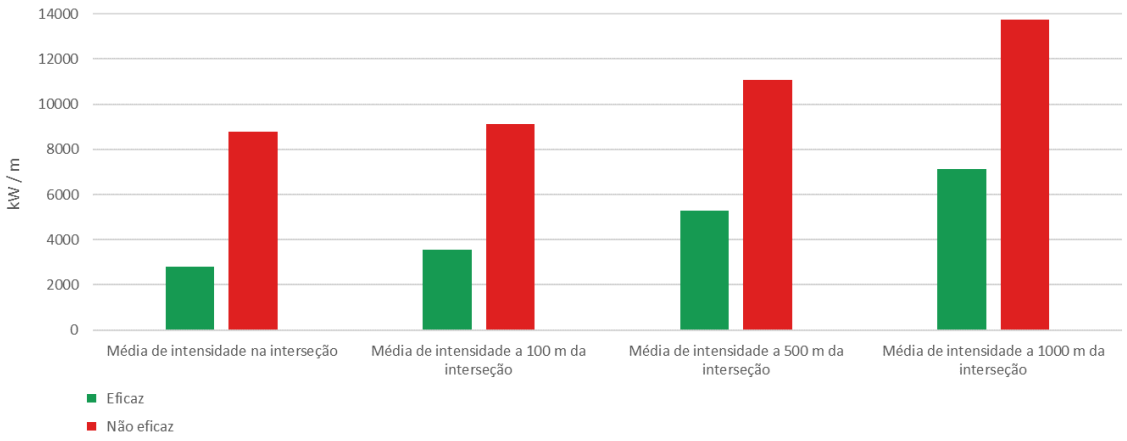


Figura 19 – Comparação da intensidade da frente de chamas estimada nas interseções e a múltiplas distâncias

4.1.3 Direção de propagação

Na figura 20 identificam-se os perfis da direção de propagação dos trajetos que compuseram a propagação de cada caso de estudo. A verde diferencia-se o perfil da direção de propagação dos trajetos que resultaram em interseções eficazes; a vermelho identifica-se o perfil da direção de propagação dos trajetos que resultaram em interseções não eficazes. Em cada gráfico radar resume-se a orientação da direção de propagação da totalidade dos trajetos que deram origem às interseções.

Analisando o conjunto de dados na sua totalidade, observa-se que a maior parte dos trajetos que geram interseções eficazes progridem em direção a nordeste (5,9% do total); de forma inversa, a maioria dos trajetos que geram interseções sem eficácia progridem em direção a este (18,4% do total).

Figura 20 – Distribuição da direção de propagação das interseções, por caso de estudo e por eficácia verificada

4.1.4 Diferença em relação à direção de propagação

Para efeitos interpretativos as interseções foram classificadas de forma binária: interseção alinhada com a cabeça do incêndio (até uma diferença de 22,5º) ou desalinhada (diferença entre 22,5º e 180º). Atendendo à eficácia observada na totalidade do conjunto de dados, constata-se que 63% das interceções eficazes resultam a partir de trajetos desalinhados com a cabeça do incêndio. Este facto remete à avaliação do comportamento estimado do fogo, onde a velocidade de progressão é inferior em todas as zonas do incêndio comparativamente com a cabeça. Nas interseções produzidas por trajetos alinhados com a direção da cabeça do incêndio, a velocidade de progressão média estabelece-se em 0,24 m/s, contrastando com 0,16 m/s nas interseções produzidas por trajetos desalinhados com a direção da cabeça do incêndio. Também se verifica diferenciação na intensidade estimada da frente de chamas, onde a média das interseções alinhadas com a cabeça do incêndio é de 10 264 kW/m e a média das interseções desalinhadas é de 4 793 kW/m. Na figura 21 demonstram-se os histogramas angulares por caso de estudo, colocando em perspetiva a diferença em relação à direção de propagação das interseções eficazes e não eficazes.

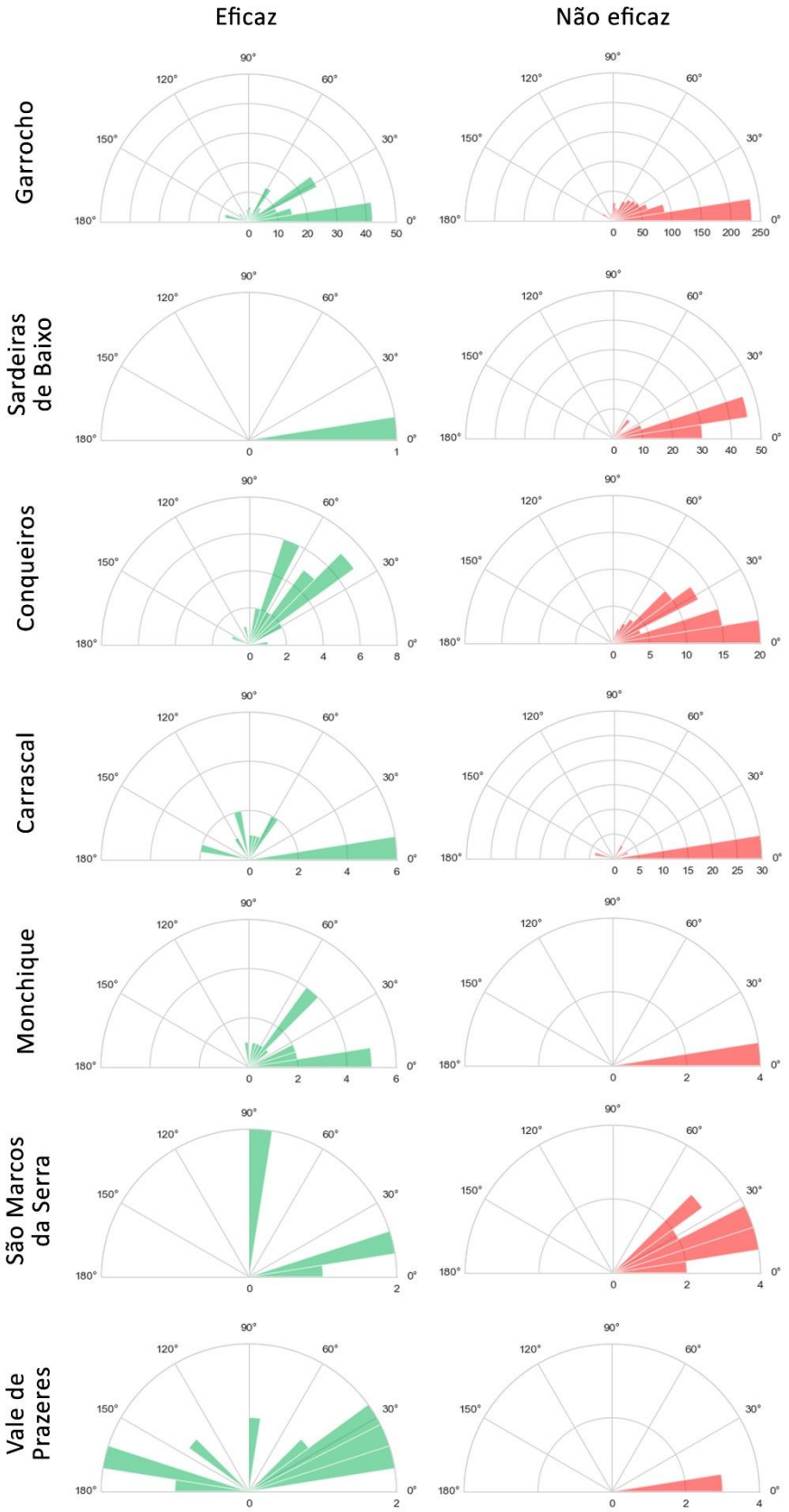


Figura 21 -Distribuição da diferença em relação à direção de propagação das interseções, por caso de estudo e por eficácia verificada

4.1.5 Ângulo de entrada do fogo na RPFGC

A figura 22 diferencia o perfil de interseção dos trajetos por caso de estudo e pela eficácia verificada. Cada histograma angular representa a frequência absoluta de interseções por ângulo de contacto com a RPFGC. Em média, o fogo interceta a RPFGC com um ângulo de 93º. As interseções com eficácia verificada intercetam a RPFGC com um ângulo de 91º, enquanto nas interseções sem eficácia verificada o ângulo de interseção é de 93º. Pode-se, portanto, afirmar que os trajetos que originam interseções eficazes contactam com a rede primária com maior perpendicularidade comparativamente aos trajetos que originam interseções não eficazes.

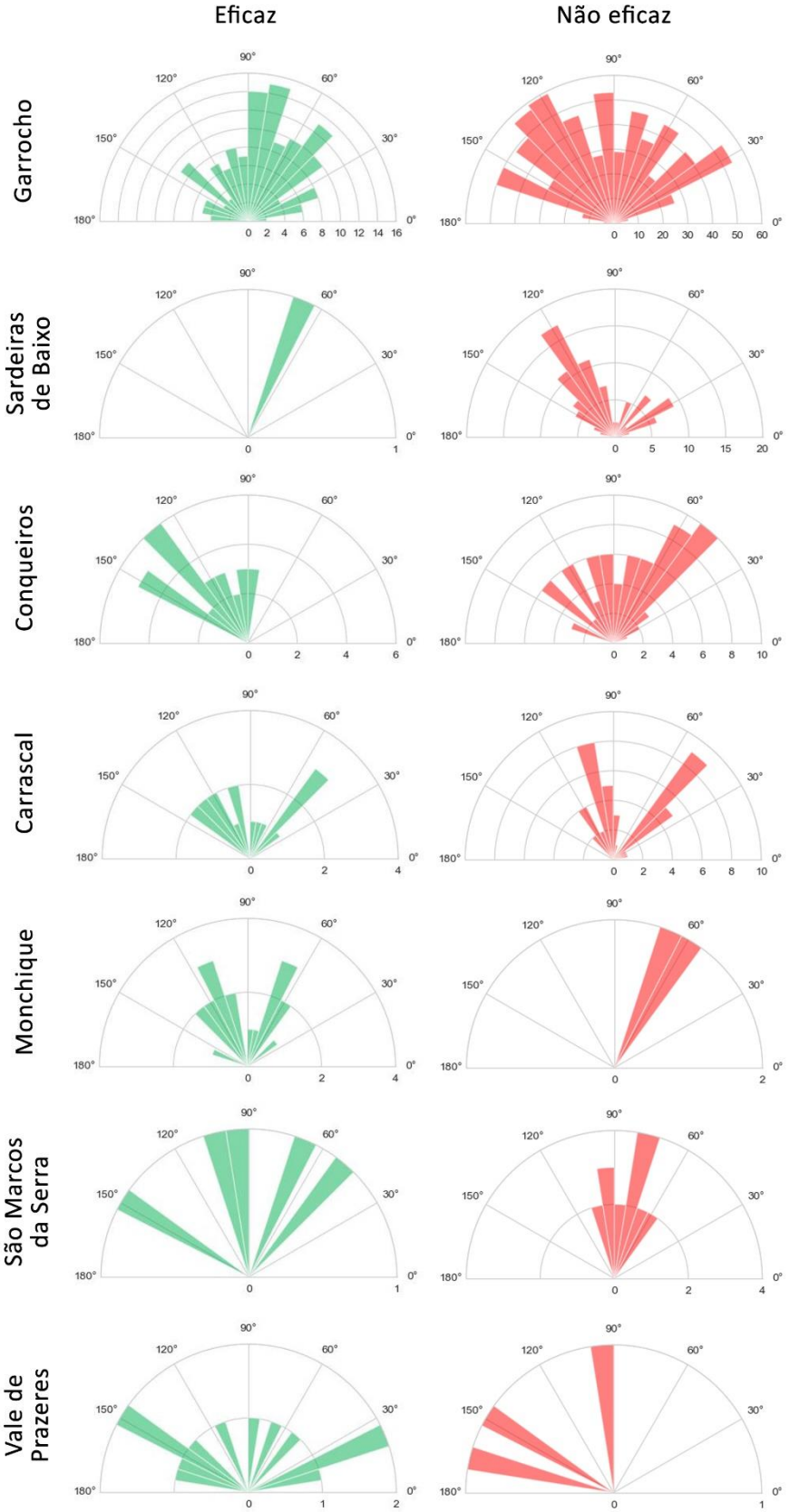


Figura 22 – Distribuição do ângulo de entrada do fogo na RPFGC das interseções, por caso de estudo e por eficácia verificada

4.1.6 Idade da intervenção na RPFGC

O gráfico da figura 23 coloca em perspetiva a idade da intervenção dos vários troços que se relacionam com os casos de estudo. Pela série (a) entende-se que 46% das interseções identificadas contactam troços cuja última intervenção foi executada entre 1 e 2 anos; interseções geradas em troços executados com idade inferior a 1 ano correspondem a 35% do conjunto de dados e interseções geradas em troços com idade entre 2 e 3 anos correspondem a 12% do total do conjunto de dados. As interseções identificadas em troços de RPFGC intervencionados há mais de 3 anos representam 7% do total do conjunto de dados.

Pelo prisma da eficácia (série (b) do gráfico da figura 24) verifica-se que 34% do total de interseções com eficácia verificada ocorre em troços de RPFGC com idade entre 1 e 2 anos. 30% do total de interseções com eficácia verificada surgem em troços intervencionados há menos de 1 ano. As interseções verificadas em troços de RPFGC com idade entre 2 e 3 anos correspondem a 23% do total de interseções com eficácia verificada. Interseções ocorridas em RPFGC intervencionada há mais de 3 anos congregam 13% do total de interseções com eficácia.

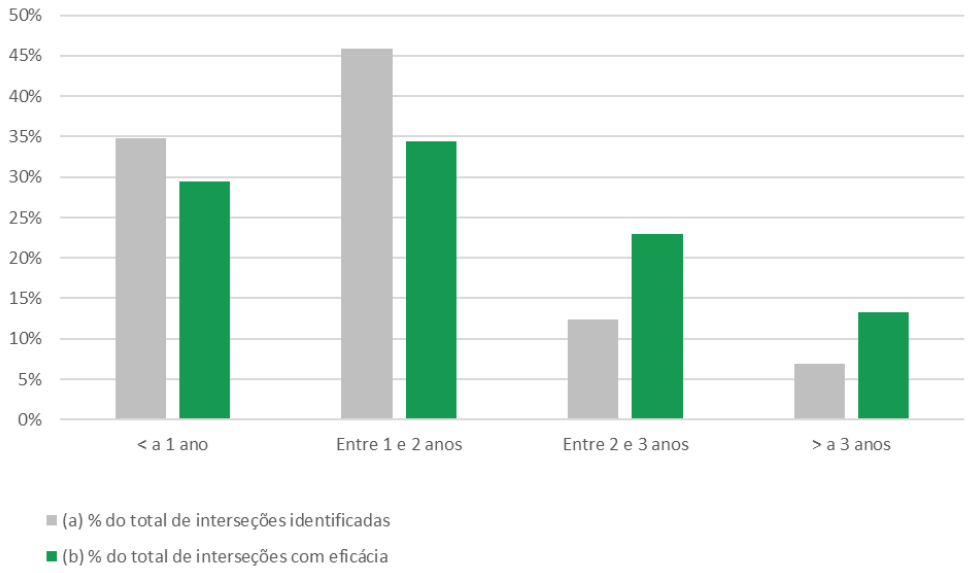


Figura 23 – Interseções por idade da intervenção na RPFGC, com diferenciação pela eficácia verificada

4.1.7 Declive

A partir da figura 24 ilustra-se a distribuição do declive das interseções por caso de estudo, diferenciando-se a eficácia da RPFGC. O declive, calculado em graus, é interpretável segundo seis classes que apoiam a perceção da variável. Considerando a totalidade do conjunto de dados, 27% das interseções foram identificadas em locais onde o declive se compreendia entre 15º e 25º (terreno inclinado), sendo esta a classe de declive com maior representatividade; seguidamente surge a classe de declive suave (25% do total de interseções) e o terceiro lugar é partilhado entre as classes de declive plano e moderado, ambas com 21% do total de interseções.

Atendendo à eficácia da RPFGC, constata-se que as interceções onde se verifica eficácia detêm o incêndio em locais onde em média o declive se estabelece em 11º; em contraste, as interseções onde a eficácia da RPFGC não é verificada ocorrem em locais onde em média o declive é de 12º. Especificando pelos casos de estudo, Vale de Prazeres é o incêndio onde a média de declive na interseção é mais elevada, tanto nas situações em que a RPFGC é eficaz (19º de média de declive) como nas situações opostas (16º de média de declive). Monchique enquadra-se como o incêndio onde a média de declive na interseção é mais baixa (5º para as interseções com eficácia e 3º para as interseções sem eficácia). No incêndio de Garrocho não existe diferenciação entre a média de declive das interseções com e sem eficácia, identificando-se para ambas as situações um declive de 12º.

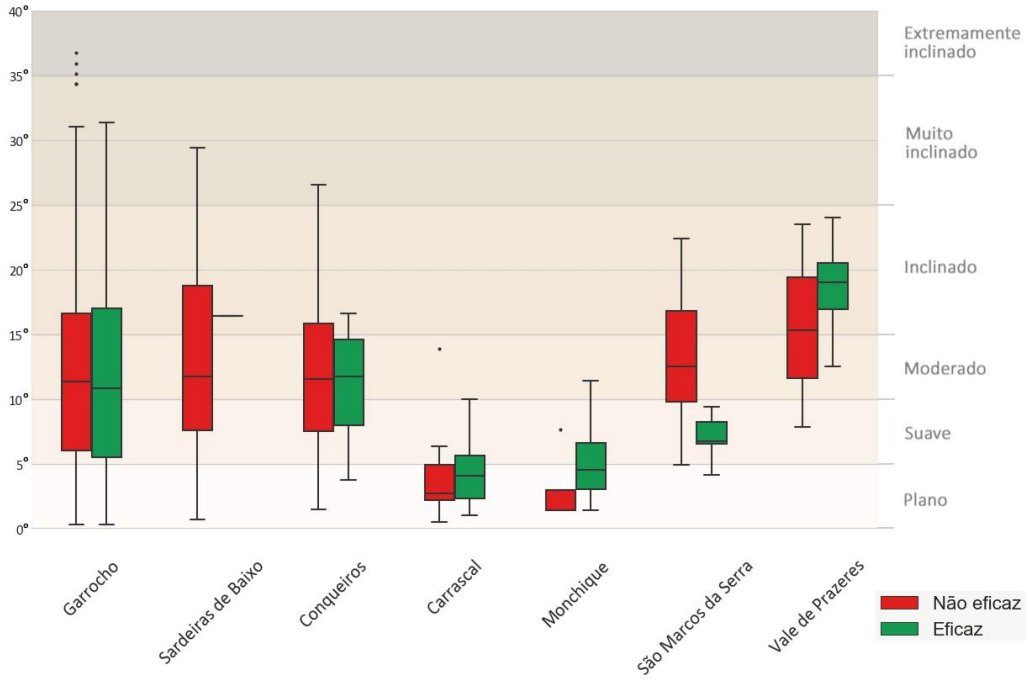


Figura 24 – Distribuição do declive das interseções, por caso de estudo e por eficácia verficada

4.1.8 Exposição

Na figura 25 demonstra-se a distribuição das interseções por caso de estudo face à exposição da vertente na qual se localizam, diferenciando pela eficácia observada. Um ponto no gráfico radar pode ser interpretado como a proporção do total de interseções no caso de estudo, que se localizam em vertentes orientadas ao ponto cardeal descrito.

No total do conjunto de dados, verifica-se que as interseções se localizam primordialmente em vertentes orientadas a este e nordeste, agregando cada uma destas orientações cardeais 23% do total de interseções identificadas. A terceira orientação cardeal com maior representatividade é sudeste, representando 19% do total de interseções. Diferenciando a análise pela eficácia, observa-se que a tendência das interseções onde não se verifica a eficácia da RPFGC mantém o padrão identificado para o total do conjunto de dados; nas interseções onde se verifica a eficácia da RPFGC, nordeste é a orientação cardeal que obtém maior representatividade (26%), seguindo-se em segundo lugar este (23%) e em terceiro sul (16%).

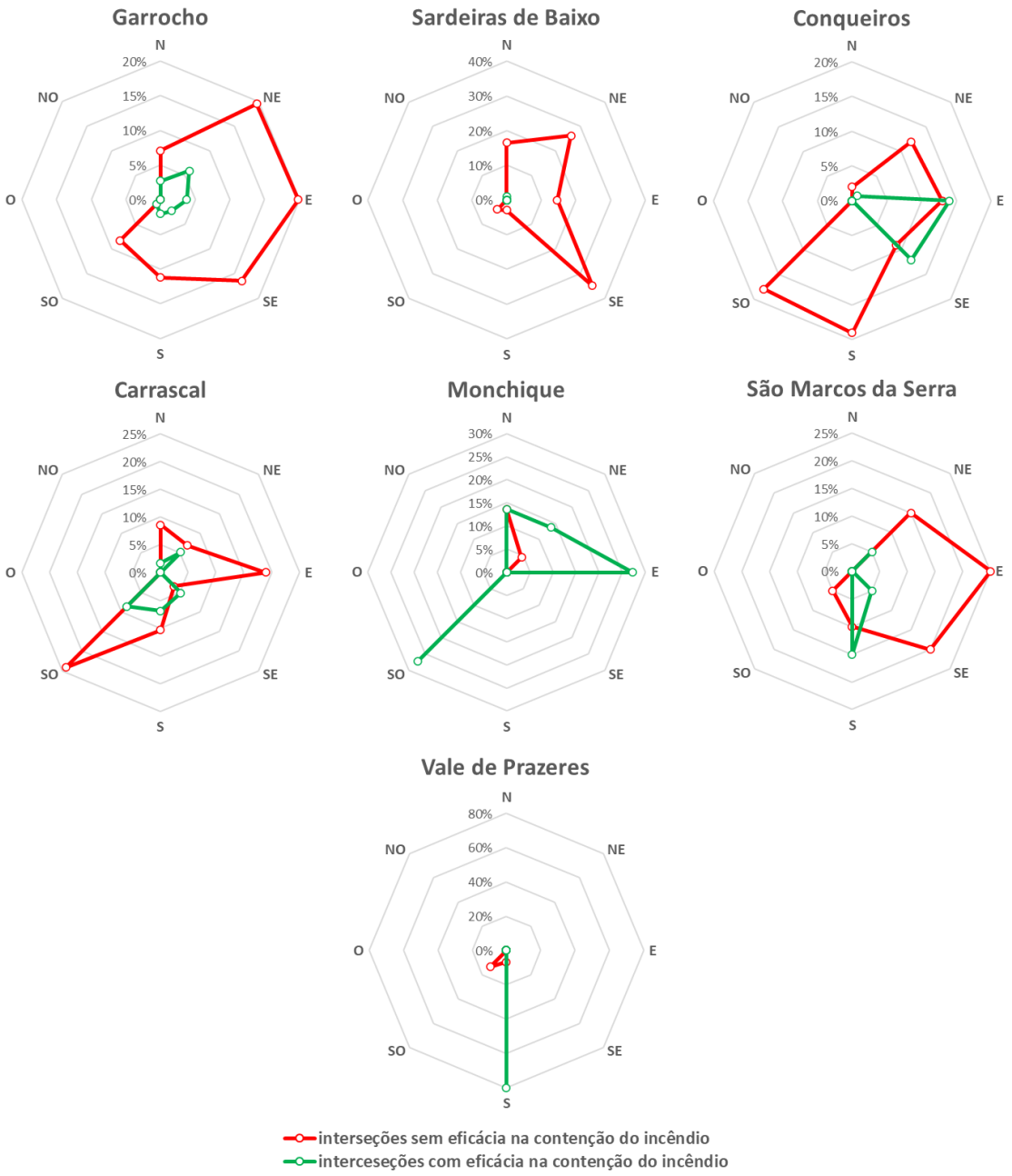


Figura 25 – Distribuição da exposição das interseções, por caso de estudo e por eficácia verificada

4.2 Classificação automática da eficácia da RPFGC

4.2.1 Comparação dos modelos de classificação automática

O desempenho dos modelos de classificação automática da eficácia da RPFGC pode ser observado inicialmente através da figura 26. Figuram-se três matrizes de confusão que retratam o desempenho absoluto da classificação obtida por cada modelo treinado. Esta comparação direta entre os resultados da eficácia modelada e da eficácia verificada é realizada a partir do conjunto de teste que individualiza 233 observações (o que corresponde a 20% do conjunto de dados).

Verifica-se que o modelo treinado a partir do algoritmo r*andom forest* classifica corretamente 32 interseções eficazes e 183 interseções não eficazes; classifica incorretamente 13 interseções eficazes e 5 interseções não eficazes. O modelo treinado pelo algoritmo *k nearest neighbor* classifica corretamente 24 interseções eficazes e 182 interseções não eficazes; classifica incorretamente 18 interseções eficazes e nove interseções não eficazes. Por último, o modelo treinado pelo algoritmo *support vector machine* classifica corretamente 21 interseções eficazes e 118 interseções não eficazes; classifica incorretamente 21 interseções eficazes e 73 interseções não eficazes.

		Eficácia **RF**		Eficácia **KNN**		Eficácia **SVM**	
		Eficaz	Não eficaz	Eficaz	Não eficaz	Eficaz	Não eficaz
Eficácia **verificada**	Eficaz	VP **32**	FN 13	VP **24**	FN 18	VP **21**	FN 21
	Não eficaz	FP 5	VN **183**	FP 9	VN **182**	FP 73	VN **118**

Figura 26 – Matrizes de confusão dos modelos de classificação automática implementados

Para melhor comparar o desempenho dos três modelos, ilustra-se na tabela 4 a taxa de verdadeiros positivos (percentagem de interseções eficazes corretamente classificadas), a taxa de verdadeiros negativos (percentagem de interseções não eficazes corretamente classificadas) e a exatidão (proximidade global do modelo à realidade). O modelo gerado pelo algoritmo *random forest* demonstra capacidade em classificar corretamente 71% das interseções eficazes e 97% das interseções não eficazes. Por oposição o modelo treinado pelo algoritmo *support vector machine* é o que revela pior desempenho: classifica corretamente apenas 50% das interseções eficazes e 62% das interseções não eficazes. Relativamente ao modelo treinado pelo algoritmo *k nearest neighbor,* o seu desempenho em classificar corretamente interseções eficazes estabelece-se nos 57%, conseguindo distinguir-se com o valor de 95% de interseções não eficazes corretamente classificadas.

Globalmente é modelo treinado pelo algoritmo *random forest* que obtém a melhor exatidão, conseguindo determinar corretamente a eficácia de 92% do conjunto de teste. Na segunda posição surge o modelo gerado pelo algoritmo *k nearest neighbor,* com uma exatidão de 88%; com o pior desempenho surge o modelo gerado pelo algoritmo *support vector machine*, que classifica corretamente a eficácia de 60% do conjunto de teste.

Tabela 4 – Comparação de métricas de avaliação do desempenho dos modelos de classificação automática implementados

	RF	KNN	SVM
% de verdadeiros positivos	71%	57%	50%
% de verdadeiros negativos	97%	95%	62%
Exatidão	**92%**	**88%**	**60%**

4.2.2 Importância das variáveis

A determinação da importância das variáveis surge como uma forma de interpretar o modelo que gerou maior exatidão na classificação automática da eficácia da RPFGC. Na figura 27 demonstra-se o resultado da métrica *Permutation Feature Importance* calculada para o modelo gerado a partir do algoritmo *random forest*.

A velocidade de propagação foi a variável que mais contribuiu para a exatidão do modelo *random forest*, verificando-se que a permutação aleatória dos seus valores resultou num declínio da exatidão em 7%. Considerando que a exatidão base (sem permutações) foi de 92%, infere-se que sem a inclusão desta variável esta percentagem seria reduzida para 85%. Em sequência, a segunda variável com maior peso no modelo em análise foi a intensidade da frente de chamas, contribuindo 5,6% para o declínio da exatidão base do modelo. A terceira variável com maior importância é o BUI, onde a permutação aleatória dos seus valores implica uma diminuição da exatidão em 2,7%.

Segundo a métrica adotada, as três variáveis que projetaram menos dependência na exatidão do modelo em análise foram o declive (0,1%), diferença em relação à direção de propagação (0,1%) e o ângulo de entrada do fogo na RPFGC (0,2%). As restantes variáveis (FWI, direção de propagação, exposição, idade da intervenção na RPFGC e FFMC) estabeleceram uma importância enquadrada entre 1,9% (FWI) e 0,4% (FFMC).

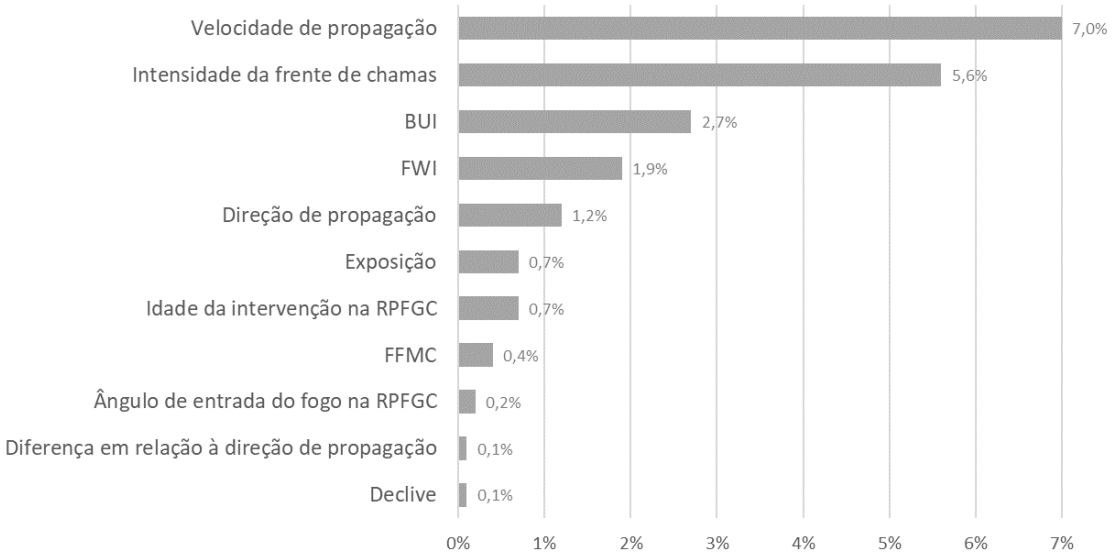


Figura 27 – Importância relativa das variáveis independentes no modelo treinado pelo algoritmo random forest

5 DISCUSSÃO

5.1 Eficácia observada e eficácia modelada

Considerando a totalidade do conjunto de dados, observa-se que os níveis de eficácia da RPFGC são extremamente variáveis entre os sete casos de estudo considerados. Em Monchique, o troço de RPFGC que interceta o incêndio obtém uma eficácia de 82%; em Sardeiras de Baixo apenas 1% da RPFGC contactada pelo incêndio foi coincidente com o seu perímetro final. Também a frequência de interseções identificadas é bastante variável ao longo dos sete casos de estudo, não sendo equitativo o seu contributo para a totalidade do conjunto de dados, mas sim proporcional à área de RPFGC intercetada. Considerando a desajustada contribuição do incêndio de Garrocho para a totalidade do conjunto de dados, verifica-se que a desconsideração deste caso de estudo contribuiria para um aumento da eficácia verificada, subindo de 19% para 25% a percentagem de interseções que se

demonstrariam úteis na contenção dos incêndios. Uma forma de reajustar estas assimetrias poderia passar pela consideração de um maior número de casos de estudo, estabelecendo-se comparações entre os mesmos baseadas na similitude da eficácia verificada e da área de RPFGC intersetada.

Observando os resultados da modelação por meio de classificação automática, considera-se que através da implementação dos algoritmos *random forest* e *k nearest neighbor* é possível obter uma boa previsão acerca da eficácia da RPFGC. Os seus níveis de exatidão foram de 92% e 88% respetivamente, considerando um conjunto de dados de dimensionalidade reduzida em que os requerimentos de dados iniciais são também reduzidos. Em contrapartida, o modelo treinado pelo algoritmo *support vector machine* não serve para prever sobre a eficácia da RPFGC, demonstrando resultados pouco coerentes com a eficácia verificada. Considerando o algoritmo *random forest* como uma versão evoluída de *decision tree*, verifica-se que o primeiro obtêm maior exatidão comparativamente com o modelo treinado por *decision tree* incluído no trabalho de Ortega et al. (2024), onde o autor demonstra uma exatidão de 83,5%. O referido trabalho devolve a maior exatidão a partir de um modelo treinado por *artificial neural network* (89,3%), a qual ainda se posiciona aquém da exatidão derivada do modelo treinado por *random forest* aqui apresentado.

Atentando à derivação da importância das variáveis, percebe-se que são as variáveis relacionadas com o comportamento estimado do fogo que tiveram maior influência na resposta do modelo. A velocidade de propagação e a intensidade de frente de chamas lideram o grupo de importância com reconhecida diferença em relação à terceira variável com maior importância. Desconsiderando simultaneamente esta dupla de variáveis de comportamento estimado do fogo, o modelo sofreria um declínio da sua exatidão em 12,6%. Se considerássemos a exclusão de todas as variáveis relativas ao comportamento estimado do fogo, este valor escalaria para os 13,9%, tornando-se um modelo de classificação de eficácia com uma exatidão global de 78,1%. Na terceira e quarta posição encontram-se as variáveis BUI e FWI, que demonstra um afastamento de 2,9% face à segunda variável com maior importância. Pela desconsideração do grupo de variáveis relativas à meteorologia de incêndio, a

exatidão do modelo sofreria um declínio de 5%, menos de metade do impacto provocado pela desconsideração do grupo de variáveis relativas ao comportamento estimado do fogo. O grupo de variáveis inerentes às características da RPFGC reflete na totalidade uma importância de 0,9%, enquanto o grupo de variáveis descritoras do terreno detêm uma importância de 0,8%. A partir deste racional considera-se que a descrição do comportamento do fogo é crucial para prever sobre a eficácia da RPFGC, obtendo os restantes grupos de variáveis uma menor proeminência para alcançar este objetivo. Este facto é corroborado pela análise de importância de variáveis derivadas por Gannon et al. (2023), onde apesar de ligeiras diferenças na natureza das variáveis, é também o comportamento estimado do fogo que maior influência exerce sobre a exatidão dos modelos de eficácia.

5.2 Limitações

Relativamente às limitações identificadas, é pertinente referir a escassez de trabalho científico desenvolvido no âmbito da avaliação da eficácia de faixas de gestão de combustível considerando dados de ocorrências reais. Em Portugal será mesmo inexistente, havendo apenas a tentativa de modelar a eficácia tendo por base simulações de incêndios (Aparício et al., 2022). Este facto demonstrou significativo impacto na concretização dos objetivos propostos, uma vez que o ponto de partida deste trabalho não foi ancorado num método anteriormente proposto. Desta limitação estrutural advém também a dificuldade em comparar os resultados de avaliação da eficácia da RPFGC com outros trabalhos de âmbito nacional. No entanto, é também através desta limitação que surge a pertinência da proposta aqui apresentada.

A maior limitação identificada prende-se com os dados. A inacessibilidade a informação acerca da existência de supressão, da estratégia e das ações implementadas resulta num desconhecimento acerca da diferenciação entre a eficácia ativa e passiva da RPFGC. Em Portugal, existe uma ferramenta operacional de apoio à decisão (FEB Monitorização), implementada pelo Grupo de Análise e Uso do Fogo da

Força Especial de Proteção Civil, que serve para recolher e disponibilizar informação crítica para a resolução de ocorrências de incêndio rural. Esta informação, naturalmente de carácter reservado, poderá ser útil para entender a influência do posicionamento dos meios e das estratégias de combate na eficácia da RPFGC. Outras alternativas passariam pela integração do registo de localização de rádios móveis e portáteis integrados na rede SIRESP como *proxy* à localização dos meios, ou a análise de fitas do tempo, onde se descrevem as principais decisões operacionais durante a supressão de um incêndio. Variáveis que descrevem as estratégias de supressão ou presença de meios de combate nas faixas de gestão de combustível têm-se demonstrado relevantes para a modelação da eficácia. Destacam-se as variáveis *"type of suppression work executed on fuel break"* considerada por Ortega et al. (2024) ou *"supression"* de Gannon et al. (2023).

O nível de incerteza envolvido no método de construção das progressões de incêndio (descrito no anexo 4) poderá também ser visto como uma fragilidade, resultando numa imprecisa noção acerca da localização intermédia do fogo ao longo de uma ocorrência. A definição de fronteiras generalistas dotadas de baixa frequência de vértices ao longo dos seus segmentos poderá ser um exemplo desta incerteza. Acredita-se que a qualidade das progressões de incêndio possa vir a ser potenciada através i) do fomento do hábito de recolha de dados geográficos nos teatros de operação; ii) do desenvolvimento tecnológico de sensores de deteção remota aplicáveis em contexto de incêndio rural com elevada resolução temporal e iii) do aumento de operacionais com tarefas dedicadas ao apoio à decisão. A partir destes esforços advirá maior detalhe espacial e temporal sobre a localização dos incêndios, podendo-se inferir com maior certeza acerca do comportamento do fogo e da relação que este estabelece com a RPFGC.

Também são observadas limitações no conjunto de dados relativo à execução da RPFGC, nomeadamente na reduzida informação caracterizadora da implementação da infraestrutura. Em particular, denota-se a ausência de informação i) acerca das espécies intervencionadas; ii) estimativa do volume de biomassa eliminado e do volume de biomassa mantido e acerca da iii) recuperação da vegetação ao longo do

tempo. A indisponibilidade ou inexistência deste tipo de informação limita também a avaliação da eficácia do ponto de vista das características da RPFGC e da descontinuidade proporcionada no espaço rural.

As vulnerabilidades verificadas pela inacessibilidade ou inexistência de toda a informação supramencionada reduzem o potencial desta avaliação da eficácia da RPFGC em território nacional, assumindo-se que existem variáveis de elevada importância que se posicionam à margem das considerações deste trabalho.

A localização dos casos de estudo selecionados poderá também ser entendida como um constrangimento. Em primeiro lugar, a ausência de heterogeneidade espacial na localização dos incêndios limita a extrapolação de conclusões representativas da eficácia da RPFGC ao nível nacional. Esta limitação poderia ser minimizada caso houvesse uma seleção de casos de estudo com distribuição ponderada pela localização dos troços de RPFGC executados.

O custo computacional da identificação e caracterização das interseções demonstrou-se elevado. Em particular, a modelação do trajeto provável do fogo foi uma tarefa que, após automatizada, demorou bastante na sua execução. Esta limitação foi imposta pela adoção de uma lógica baseada em análise de redes, onde a implementação do algoritmo *closest facility* para cada ponto de destino incorreu numa expectável baixa eficiência. Utilizando uma máquina com 32 GB de RAM, processador de 14 núcleos com velocidade máxima de 4,7 GHz e SSD de 1 TB, a execução da automação desenvolvida teve uma duração de 7h30m para o grupo de casos de estudo constituídos por São Marcos da Serra, Monchique, Vale de Prazeres e Sardeiras de Baixo; 15h para o grupo Carrascal e Conqueiros e 17h unicamente para Garrocho. Desta forma totalizou-se uma duração de 39h30m para executar o último processamento dos sete casos de estudo. Verifica-se também que este custo computacional lentificou o desenvolvimento da análise.

A metodologia proposta empenhou-se essencialmente na identificação e caracterização das interseções entre o fogo e a RPFGC, uma vez que não existe qualquer informação prévia acerca destes encontros. A avaliação da eficácia corresponde apenas à última etapa metodológica, passível de executar após ser

constituído e caracterizado o conjunto de interseções identificadas ao longo dos sete casos de estudo. Por ter sido concentrado um maior esforço na automação da aquisição e caracterização das interseções, admite-se que a etapa afeta à avaliação da eficácia por métodos de classificação automática possa ter sido simplificada, evidenciando-se: i) ausência de métodos de classificação com maior inteligibilidade (como é exemplo o algoritmo *decision tree*); ii) ausência de comparação entre múltiplas métricas de avaliação dos modelos treinados e iii) ausência de uma exploração mais aprofundada sobre a importância das variáveis na exatidão dos modelos treinados.

5.3 Contribuições, implicações práticas e desenvolvimentos futuros

Considera-se que as principais contribuições deste trabalho consistem i) na definição de um ponto de partida para a avaliação da RPFGC portuguesa, destacando-se pela observação da relação estabelecida entre a mesma e os incêndios ocorridos; ii) na proposta de um método que potencia a amostragem automatizada das interseções, escalável e replicável, com utilidade na análise futura de outras ocorrências reais; iii) na proposta de uma perspetiva centrada na utilidade da RPFGC, até então inexistente e iv) na verificação de que é o comportamento do fogo que se estabelece como elemento chave para um melhor planeamento da infraestrutura.

As implicações práticas deste trabalho assentam na alteração de processos técnicos, nos quais a integração deste tipo de análise possa ser uma mais-valia na gestão e análise do fogo rural. Avaliar o resultado efetivo da implantação da RPFGC é crucial para a otimização do planeamento da infraestrutura, demonstrando também utilidade na priorização da sua hercúlea execução. Com a melhoria da eficiência computacional, esta análise poderá também ser integrada como uma componente das ferramentas de apoio à decisão operacional já existentes. A aplicação dos modelos treinados poderão auxiliar na predição da eficácia da RPFGC, tendo por base simulações de incêndio no lugar das progressões aqui utilizadas. Desta forma seria possível avaliar o potencial de ancoragem de determinado incêndio num troço de

RPFGC, considerando as condições verificadas em tempo real.

Para além da integração de todas as sugestões supramencionadas, seguem-se algumas propostas para desenvolvimentos futuros: i) replicar a análise tendo por base um número significativamente maior de incêndios, integrando novas variáveis independentes focadas nas ações e estratégias de supressão; ii) desenvolver uma versão *open source* do *script* desenvolvido para aquisição e caracterização das interseções, democratizando a sua utilização; iii) integrar uma componente de quantificação dos benefícios da eficácia verificada da RPFGC, estimando acerca da área ardida evitada e das infraestruturas protegidas, recorrendo por exemplo, à comparação entre as progressões de incêndio e simulações que não integrem as descontinuidades na forma de RPFGC; iv) construção de um manual de análise da eficácia da RPFGC, sistematizando e simplificando os procedimentos propostos neste trabalho por forma a promover a sua adoção por parte de analistas de incêndios e gestores do fogo rural.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho encerra na definição de uma proposta metodológica de análise da eficácia da RPFGC, tendo por base a observação da relação estabelecida entre o fogo e a descontinuidade de combustíveis proporcionada. Observou-se através de uma análise integrada dos sete casos de estudo que a eficácia desta infraestrutura é bastante variável, dependendo fortemente do comportamento estimado do fogo, em particular da velocidade de propagação e da intensidade da frente de chamas.

A motivação inicial deste trabalho foi validada pelas evidências derivadas, as quais se acreditam ser um relevante contributo para a melhoria contínua da gestão do espaço rural. Fica também patente que a dimensão espacial assume incontornável importância na análise contextual dos incêndios rurais, sendo possível através dela obter uma visão integrada sobre um problema de elevada complexidade.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agee, J. K., Bahro, B., Finney, M. A., Omi, P. N., Sapsis, D. B., Skinner, C. N., Van Wagtendonk, J. W., & Phillip Weatherspoon, C. (2000). The use of shaded fuelbreaks in landscape fire management. Forest Ecology and Management, 127(1–3), 55–66. https://doi.org/10.1016/S0378-1127(99)00116-4

Alcasena, F., Ager, A., Page, Y. Le, Bessa, P., Loureiro, C., & Oliveira, T. (2021). Assessing Wildfire Exposure to Communities and Protected Areas in Portugal. Fire 2021, Vol. 4, Page 82, 4(4), 82. https://doi.org/10.3390/FIRE4040082

Alperson-Afil, N., & Goren-Inbar, N. (2010). The Acheulian Site of Gesher Benot Ya'aqov Volume II: Ancient Flames and Controlled Use of Fire. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3765-7

Aparício, B. A., Alcasena, F., Ager, A., Chung, W., Pereira, J. M. C., & Sá, A. C. L. (2022). Evaluating priority locations and potential benefits for building a nation-wide fuel break network in Portugal. Journal of Environmental Management, 320. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.115920

Beighley, M., & Hyde, A. C. (2018). Gestão dos Incêndios Florestais em Portugal numa Nova Era Avaliação dos Riscos de Incêndio, Recursos e Reformas.

Benali, A., Guiomar, N., Gonçalves, H., Mota, B., Silva, F., Fernandes, P. M., Mota, C., Penha, A., Santos, J., Pereira, J. M. C., & Sá, A. C. L. (2023). The Portuguese Large Wildfire Spread database (PT-FireSprd). Earth Syst. Sci. Data, 15, 3791–3818. https://doi.org/10.5194/essd-15-3791-2023

Breiman, L. (2001). Random forests. Machine Learning, 45(1), 5–32. https://doi.org/10.1023/A:1010933404324/METRICS

Buma, B., & Wessman, C. A. (2013). Forest resilience, climate change, and opportunities for adaptation: A specific case of a general problem. Forest Ecology and Management, 306, 216–225. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2013.06.044

Byram, G. (1959). Combustion of forest fuels. In K. Davis (Ed.), Forest fire: control and use (pp. 61–89). McGraw-Hill.

Canadian Wildland Fire Information System. (s.d.). Disponível em https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi

Comissão Regional de Gestão Integrada de Fogos Rurais do Algarve. (2023). Programa regional de ação de gestão integrada de fogos rurais - Algarve (versão para consulta pública).

Comissão Regional de Gestão Integrada de Fogos Rurais do Centro. (2022). Programa regional de ação de gestão integrada de fogos rurais - Centro.

Comissão Técnica Independente. (2018). Avaliação dos incêndios ocorridos entre 14 e 16 de outubro de 2017 em Portugal Continental - Relatório final.

Copernicus Browser. (s.d.). Disponível em https://browser.dataspace.copernicus.eu/?zoom=5&lat=50.16282&lng=20.78613&themeId=DEFAULT-THEME&visualizationUrl=https%3A%2F%2Fsh.dataspace.copernicus.eu%2Fogc%2Fwms%2Fa91f72b5-f393-4320-bc0f-990129bd9e63&datasetId=S2_L2A_CDAS&demSource3D=%22MAPZEN%22&cloudCoverage=30&dateMode=SINGLE

Costa, H., de Rigo, D., Libertà, G., Houston Durrant, T., & San-Miguel-Ayanz, J. (2020). European wildfire danger and vulnerability in a changing climate: towards integrating risk dimensions. Publications Office of the European Union, 59. https://doi.org/10.2760/46951

Decreto-Lei n.o 22/2006, Diário da República n.o 24/2006, Série I-A de 2006-02-02 (2006). https://diariodarepublica.pt/dr/legislacao-consolidada/decreto-lei/1900-117434892

Decreto-Lei n.o 82/2021, de 13 de Outubro Do Ministério Do Ambiente e Ação Climática, Pub. L. No. Diário da República n.o 199/2021, Série I (2021). https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/decreto-lei/82-2021-172745163

EFFIS - Statistics Portal. (s.d.). Disponível em https://effis.jrc.ec.europa.eu/apps/effis.statistics/estimates

EOS. (2024). NDVI FAQs: Frequently Asked Questions About The Index. https://eos.com/blog/ndvi-faq-all-you-need-to-know-about-ndvi/

ESRI. (s.d.-a). ArcGIS Pro. Disponível em https://www.esri.com/pt-br/arcgis/products/arcgis-pro/overview

ESRI. (s.d.-b). What is ArcPy? Disponível em https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/get-started/what-is-arcpy-.htm

Fernandes, P., Fernandes, M. M., Vale-Gonçalves, H., & Loureiro, C. (2009). Modelos de Combustível Florestal para Portugal. 6° Congresso Florestal Nacional Da Sociedade Portuguesa de Ciências Florestais. https://www.researchgate.net/publication/261708410

Finney, M., McAllister, S., Forthofer, J., & Grumstrup, T. (2021). Wildland fire behaviour: dynamics, principles and processes (CSIRO, Ed.). https://www.google.com/books?hl=pt-PT&lr=&id=wqRKEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=wildland+fire+behaviour+book&ots=EJu0tlUYYq&sig=JX62OCfjWhCy5UHxLjfFvsPG6Xo

Gannon, B., Wei, Y., Belval, E., Young, J., Thompson, M., O'Connor, C., Calkin, D., & Dunn, C. (2023). A Quantitative Analysis of Fuel Break Effectiveness Drivers in Southern California National Forests. Fire, 6(3). https://doi.org/10.3390/FIRE6030104/S1

Green, L. (1977). Fuelbreaks and Other Fuel Modification for Wildland Fire Control (U.S. Department of Agriculture, Ed.).

ICNF. (2014a). Análise das causas de incêndios florestais 2003 - 2013.

ICNF. (2014b). Manual de Rede Primária.

ICNF. (2023). 8.o Relatório Provisório de Incêndios Rurais - 2023.

IPMA. (s.d.). Rural Fire Danger - Fire Weather Index. Disponível em https://www.ipma.pt/en/enciclopedia/otempo/risco.incendio/index.jsp?print=truehttps://id.elsevier.com/as/authorization.oauth2?platSite=BRX/brx&prompt=login&scope=openid%20email%20profile%20els_auth_info%20els_analytics_info%20urn:com:elsevier:idp:policy:product:indv_identity&response_type=code&redirect_uri=https://brxt.mendeley.com/exchange&authType=SINGLE_SIGN_IN&client_id=BRX-CLIENT-V2&state=5rU2HtLJ4vza_aaAS5KSF7hvg-1fuUIkSLfUZWtT44w=

KNIME. (s.d.-a). K Nearest Neighbor. Disponível em https://hub.knime.com/knime/extensions/org.knime.features.base/latest/org.knime.base.node.mine.knn.KnnNodeFactory2

KNIME. (s.d.-b). Open for Innovation | KNIME. Disponível em https://www.knime.com/?

KNIME. (s.d.-c). Random Forest Learner. Disponível em https://hub.knime.com/knime/extensions/org.knime.features.ensembles/latest/org.knime.base.node.mine.treeensemble2.node.randomforest.learner.classification.RandomForestClassificationLearnerNodeFactory2

KNIME. (s.d.-d). SVM Learner. Disponível em https://hub.knime.com/knime/extensions/org.knime.features.base/latest/org.knime.base.node.mine.svm.learner.SVMLearnerNodeFactory2

Lei n.o 27/2006, Diário da República n.o 126/2006, Série I de 2006-07-03 4696 (2006). https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/lei/27-2006-537862

Mendeley. (s.d.). Mendeley Reference Manager. Disponível em https://www.mendeley.com/reference-management/reference-manager

Microsoft. (s.d.). Visual Studio Code - Code Editing. Redefined. Disponível em https://code.visualstudio.com/

Moreira, F., Viedma, O., Arianoutsou, M., Curt, T., Koutsias, N., Rigolot, E., Barbati, A., Corona, P., Vaz, P., Xanthopoulos, G., Mouillot, F., & Bilgili, E. (2011). Landscape – wildfire interactions in southern Europe: Implications for landscape management. Journal of Environmental Management, 92(10), 2389–2402. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2011.06.028

Oliveira, T. M. de. (2017). A transição florestal e a governança do risco de incêndio em Portugal nos últimos 100 anos. https://www.repository.utl.pt/handle/10400.5/14961

Oliveira, T. M., Barros, A. M. G., Ager, A. A., & Fernandes, P. M. (2016). Assessing the effect of a fuel break network to reduce burnt area and wildfire risk transmission. International Journal of Wildland Fire, 25, 619–632. https://doi.org/10.1071/WF15146

Ortega, M., Rodríguez Silva, F., & Ramón Molina, J. (2024). Modeling fuel break effectiveness in southern Spain wildfires. Fire Ecology. https://doi.org/10.1186/s42408-024-00270-2

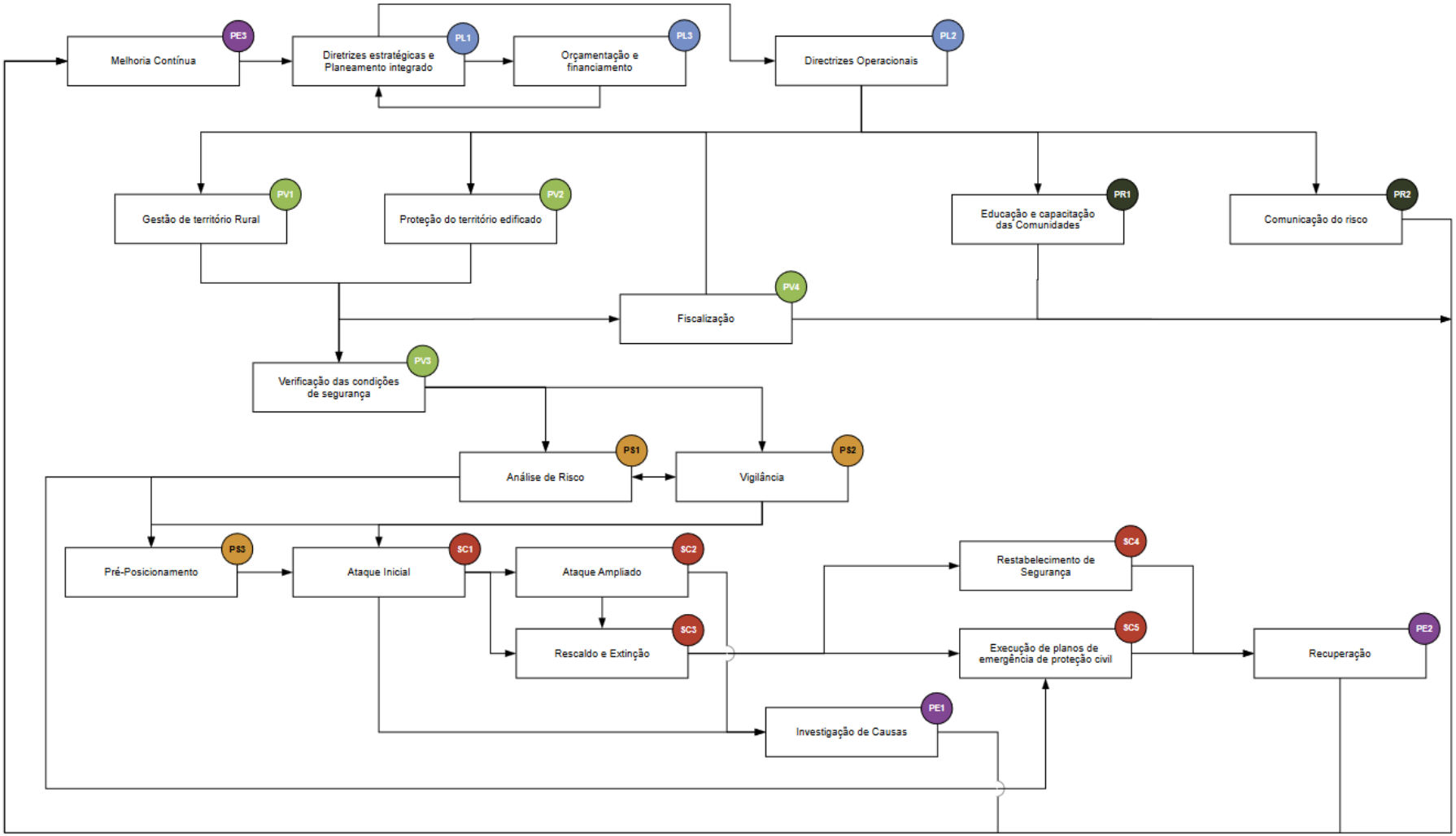
Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais 20-30 (2022). https://www.agif.pt/pt/plano-nacional-de-gestao-integrada-de-fogos-rurais-20-30

Python.org. (s.d.). About Python. Disponível em https://www.python.org/about/
Rego, F. C., Morgan, P., Fernandes, P., & Hoffman, C. (2021). Fire Science: De Chemistry to Landscape Management. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-69815-7
Resolução Do Conselho de Ministros n.o 65/2006, https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/diario-republica/102-2006-124620 3511 (2006). https://diariodarepublica.pt/dr/detalhe/resolucao-conselho-ministros/65-2006-286680
Rigolot, E., & Alexandrian, D. (2006). Learning de fuel-break behaviour during the 2003 large fires in South Eastern France. Forest Ecology and Management, 234, S227. https://doi.org/10.1016/J.FORECO.2006.08.254
Sá, A., Benali, A., Aparicio, B., Bruni, C., Mota, C., Pereira, J., & Fernandes, P. (2023). A method to produce a flexible and customized fuel models dataset. https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102218
Sentinel Hub. (2024). Sentinel 2. https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/sentinel-2-l2a/
SentiWiki. (s.d.). Sentinel 2 Processing. Disponível em https://sentiwiki.copernicus.eu/web/s2-processing#S2Processing-Step3:NormalisedDifferenceVegetationIndex(NDVI)
Syphard, A. D., Keeley, J. E., & Brennan, T. J. (2011). Factors affecting fuel break effectiveness in the control of large fires on the Los Padres National Forest, California. International Journal of Wildland Fire, 20(6), 764–775. https://doi.org/10.1071/WF10065
Weise, C. L., Brussee, B. E., Coates, P. S., Shinneman, D. J., Crist, M. R., Aldridge, C. L., Heinrichs, J. A., & Ricca, M. A. (2023). A retrospective assessment of fuel break effectiveness for containing rangeland wildfires in the sagebrush biome. Journal of Environmental Management, 341. https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2023.117903
WWF. (2019). Arde el Mediterráneo: propuesta mediterránea de WWF para la prevención de incendios forestales.

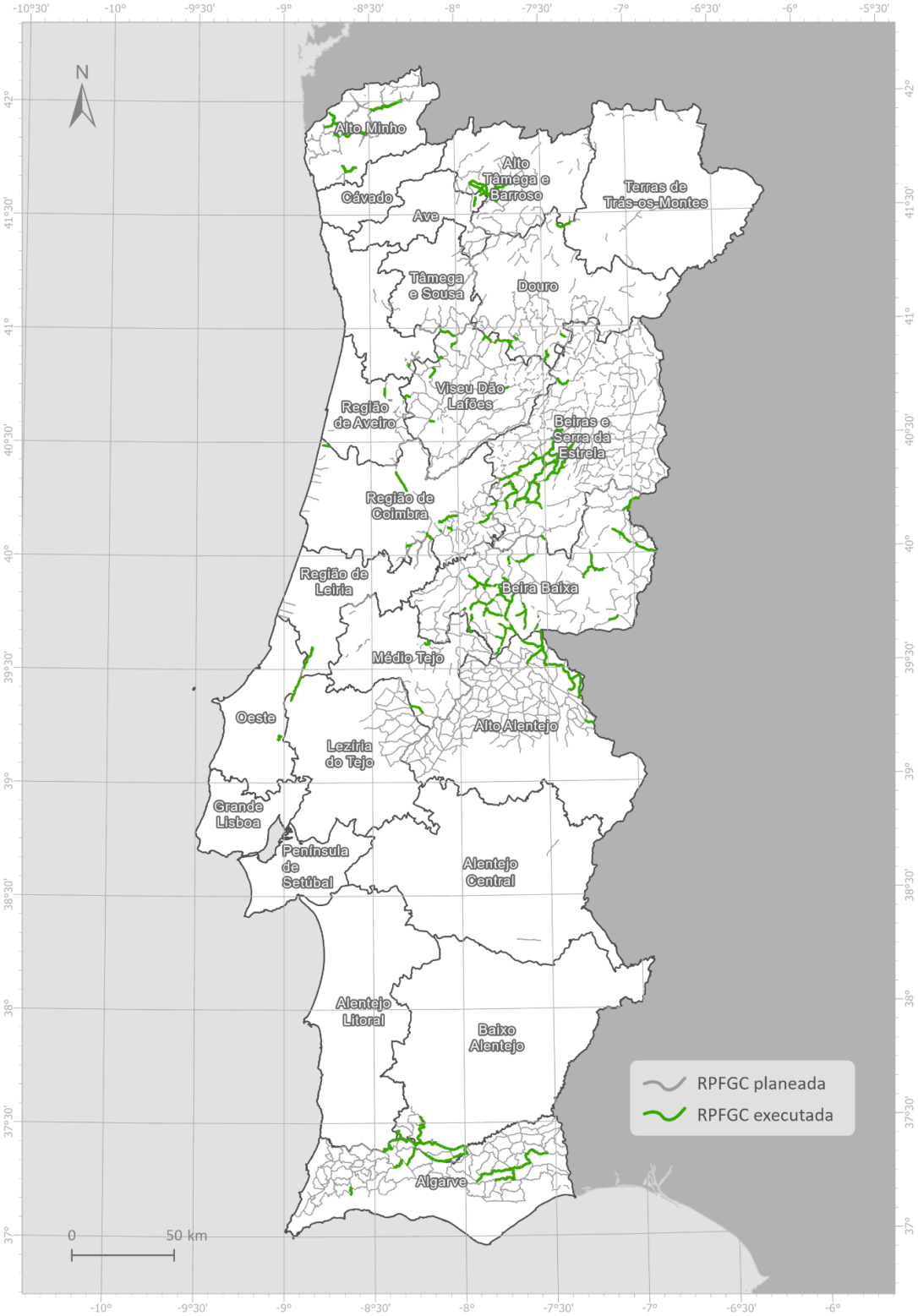
8 ANEXOS

Anexo 1: Fases da cadeia de processos do SGIFR (Resolução do Conselho de Ministros n.º 45-A/2020, de 16 de junho)

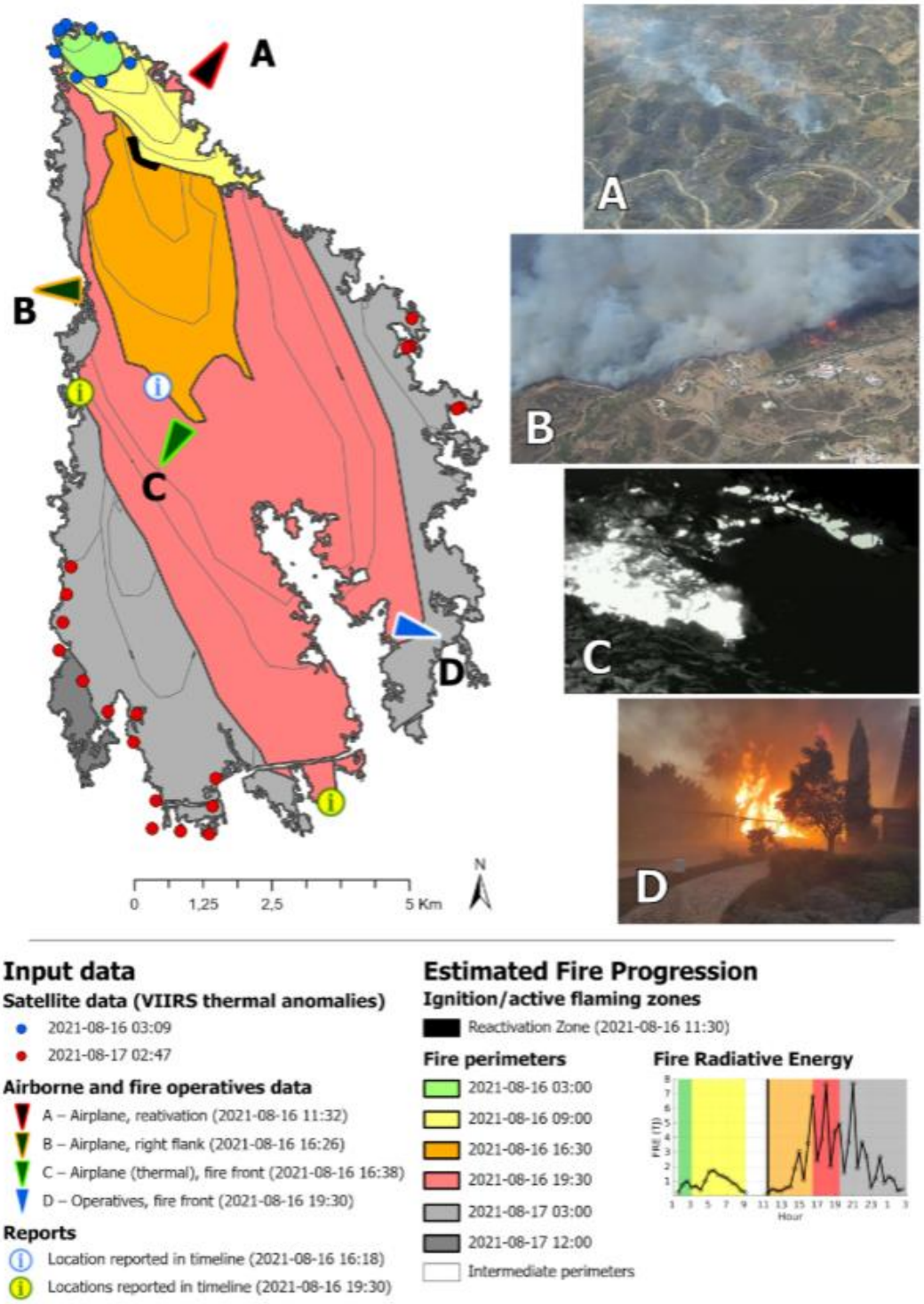
Anexo 2: Fluxograma de grandes processos da cadeia de processos do SGIFR (Resolução do Conselho de Ministros n.º 45-A/2020, de 16 de junho)



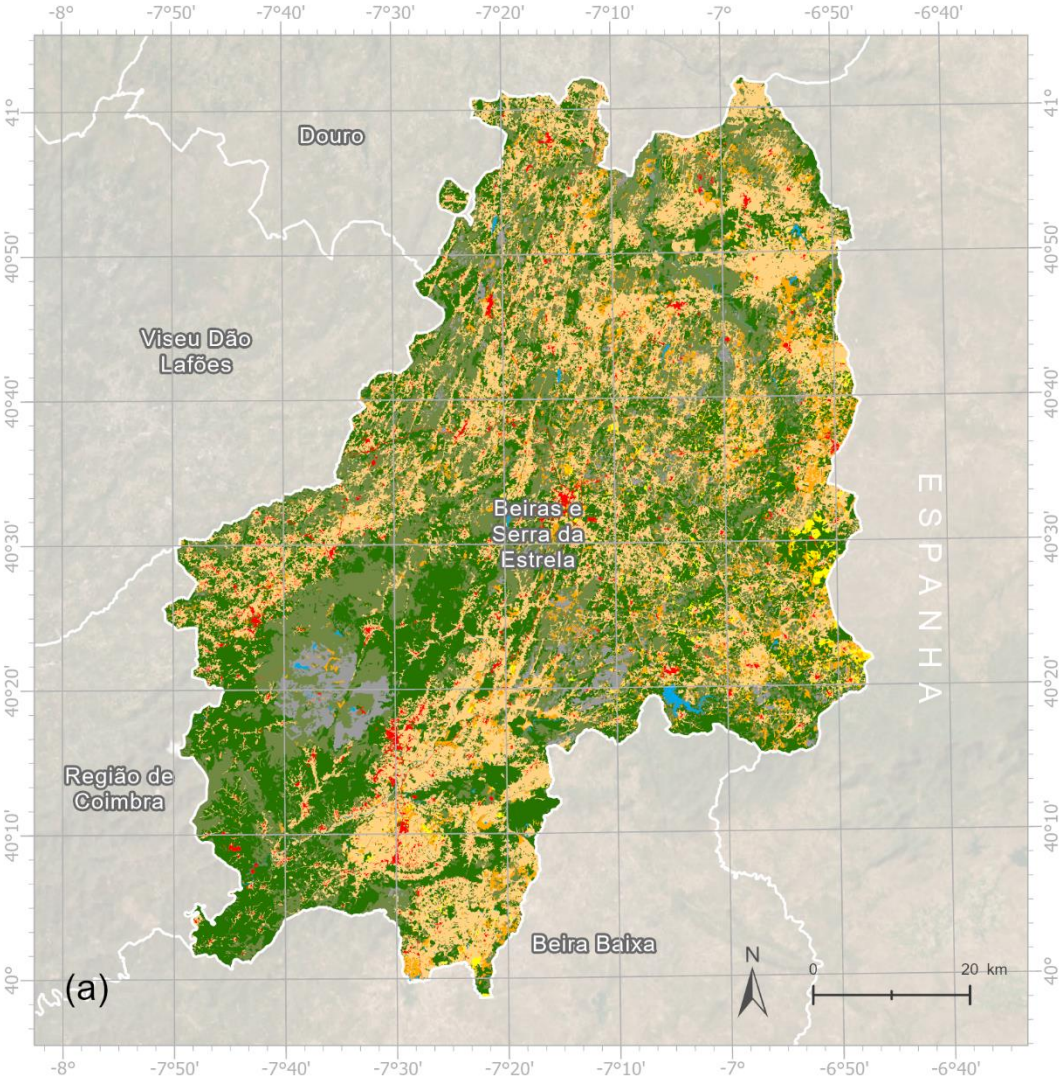
Anexo 3: RPFGC planeada (a cinzento) e executada (a verde) à escala nacional por NUT III (ICNF, 2024)

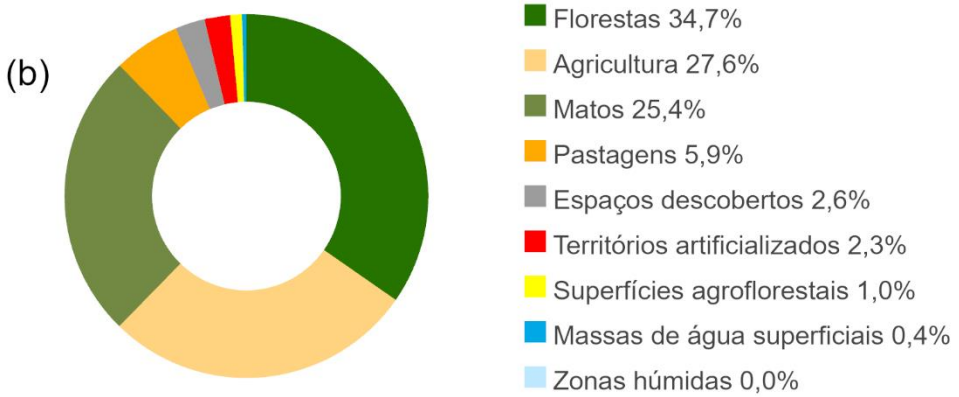


Anexo 4: Exemplo da reconstrução da progressão do incêndio de Castro Marim (2021) (Benali et al., 2023)

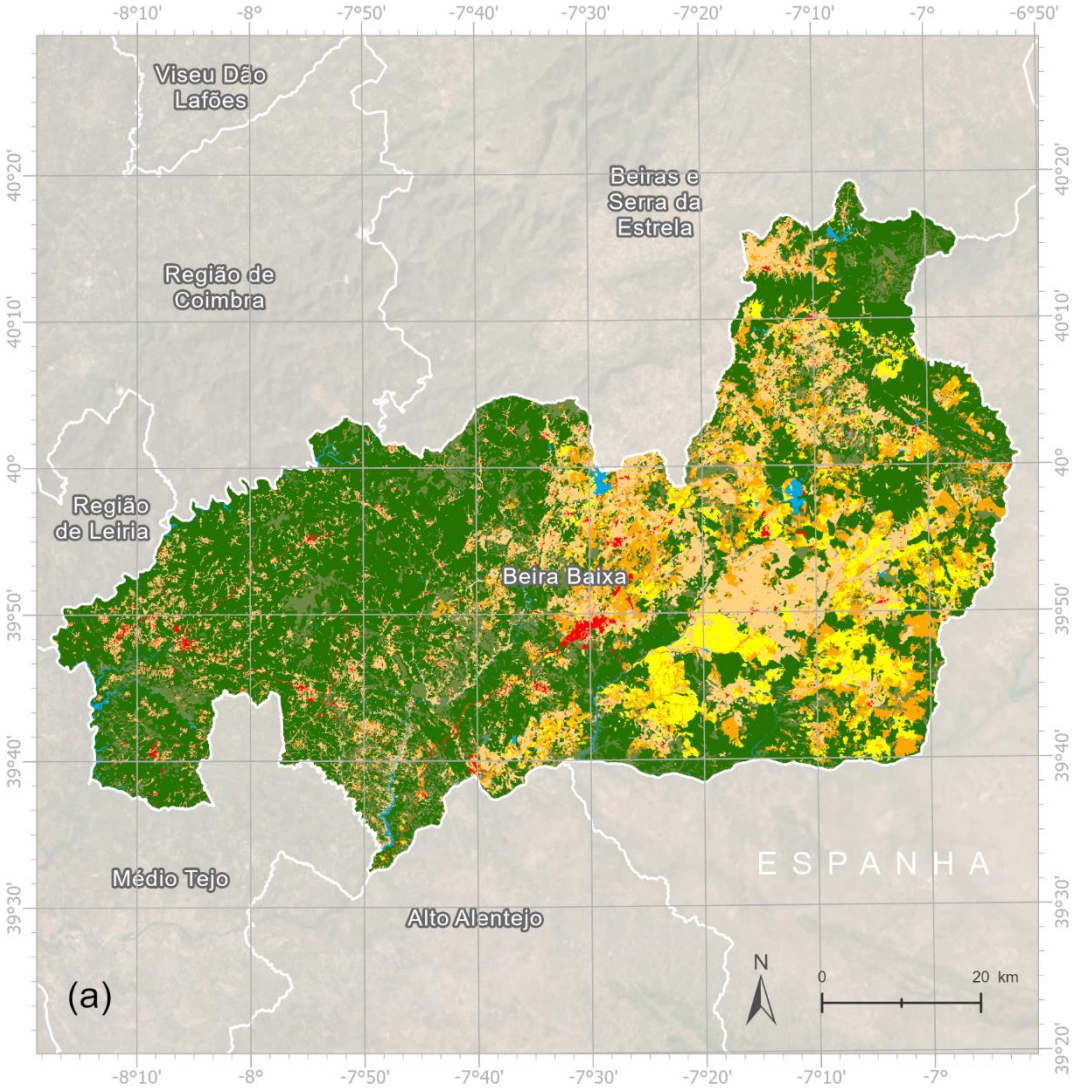


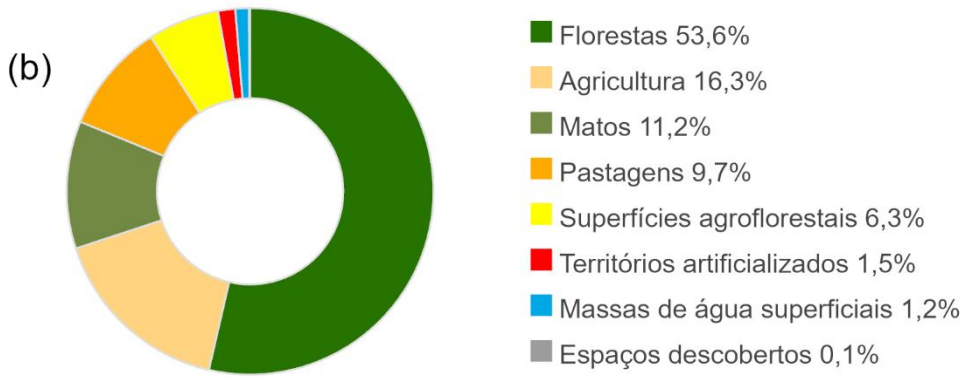
Anexo 5 - 1: Uso e ocupação do solo da NUT III Beiras e Serra da Estrela segundo a carta de uso e ocupação do solo (DGT, 2018)



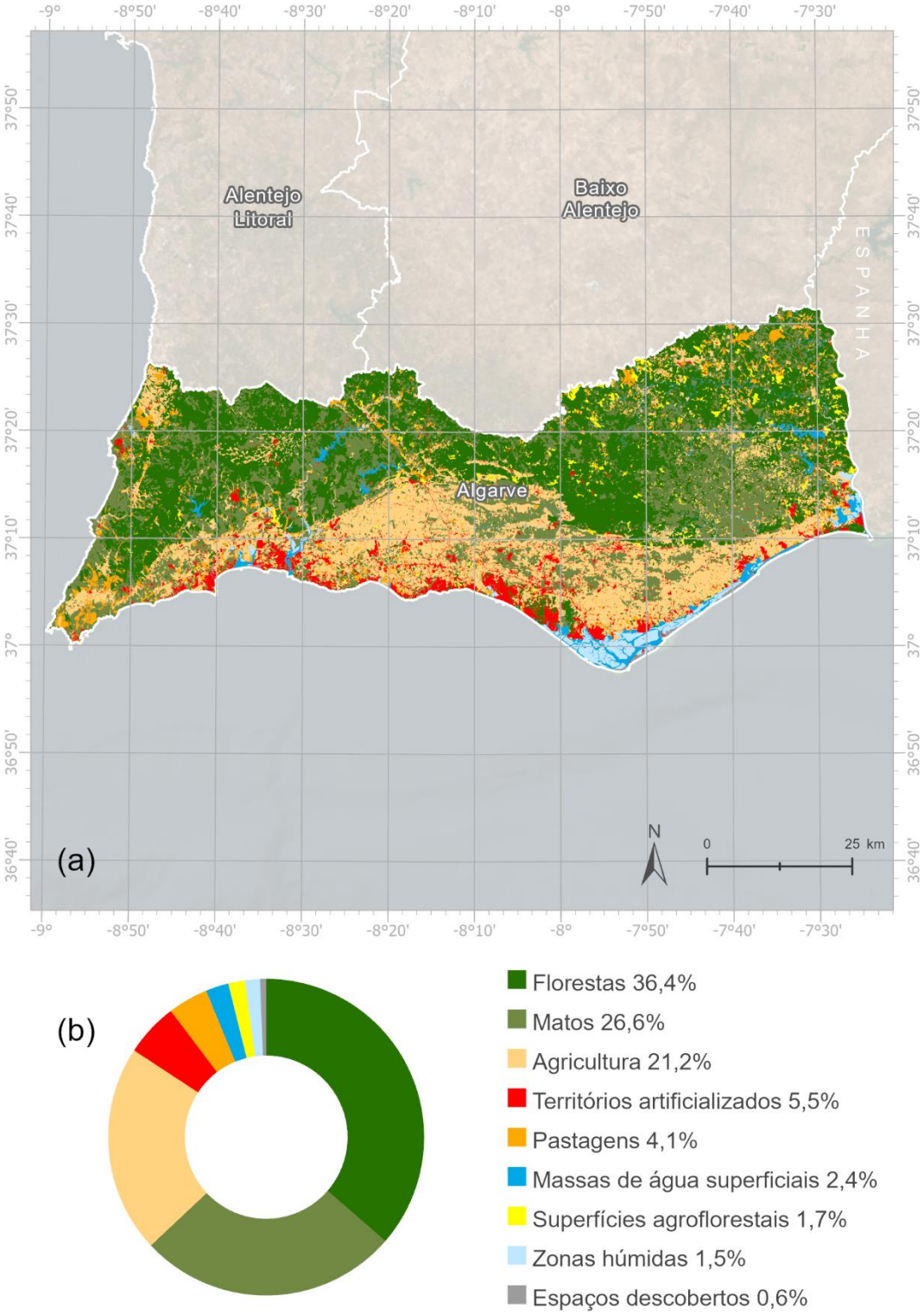


Anexo 5 - 2: Uso e ocupação do solo da NUT III Beira Baixa segundo a carta de uso e ocupação do solo (DGT, 2018)





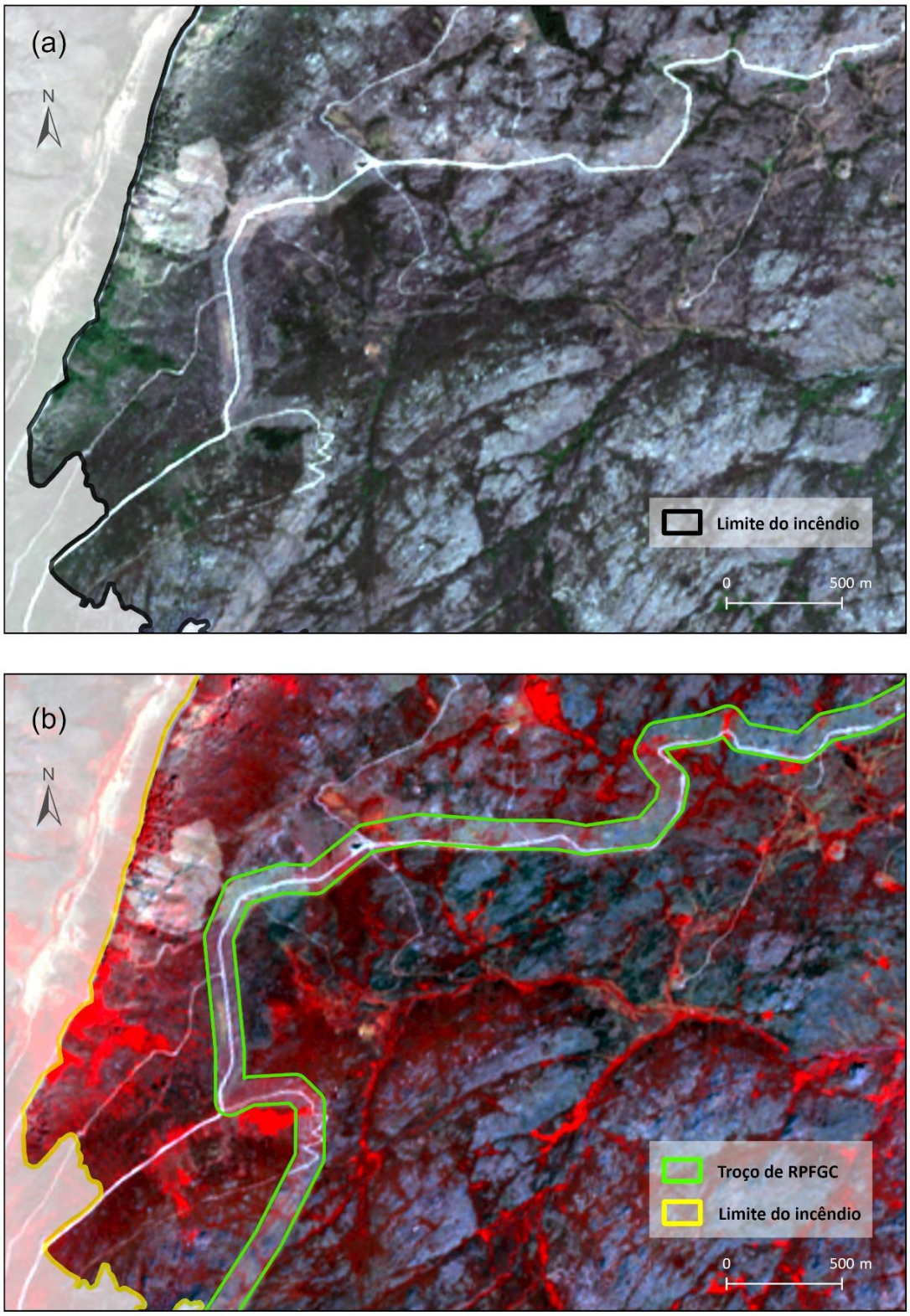
Anexo 5 - 3: Uso e ocupação do solo da NUT III Algarve segundo a carta de uso e ocupação do solo (DGT, 2018)



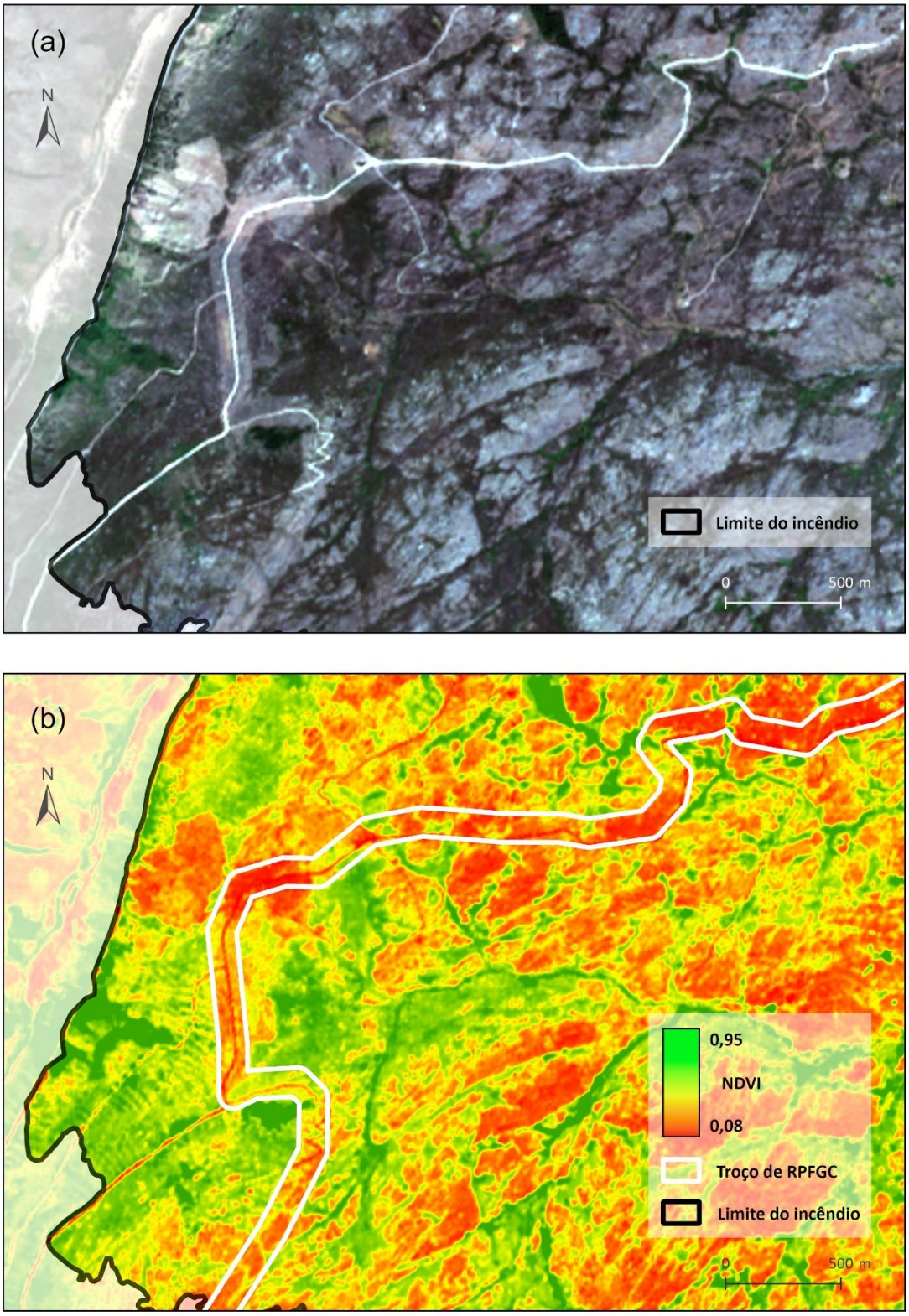
Anexo 6: Resumo das características dos casos de estudo selecionados

Caso de estudo	Duração (dias)	Área ardida (ha)	Uso do solo predominante (% da área ardida)	Velocidade de propagação média (m^{-1} / s)	Velocidade de propagação máxima (m^{-1} / s)	Altitude média (m^{-1})	Altitude máxima (m^{-1})	Altitude mínima (m^{-1})	Declive médio (graus)	Declive máximo (graus)	Exposição média (graus - ponto cardeal)
Sardeiras de Baixo	3	5 590	Floresta de pinheiro-bravo (47%)	0,23	0,6	690	1 079	369	14	41	198 - sul
Conqueiros	2	14 878	Florestas de pinheiro-bravo (75%)	0,25	0,61	617	987	335	12	42	165 - sul
Monchique	2	1 915	Matos (44%)	0,19	0,29	126	240	36	7	29	179 - sul
São Marcos da Serra	2	1 321	Florestas de sobreiro (35%)	0,15	0,33	225	337	140	11	29	176 - sul
Garrocho	29	24 334	Florestas de pinheiro-bravo (30%)	0,2	0,75	932	1 681	463	14	52	179 - sul
Carrascal	3	6 553	Florestas de pinheiro-bravo (60%)	0,19	0,5	306	604	141	10	43	173 - sul
Vale de Prazeres	1	145	Florestas de pinheiro-bravo (77%)	0,06	0,21	639	816	506	17	29	170 - sul

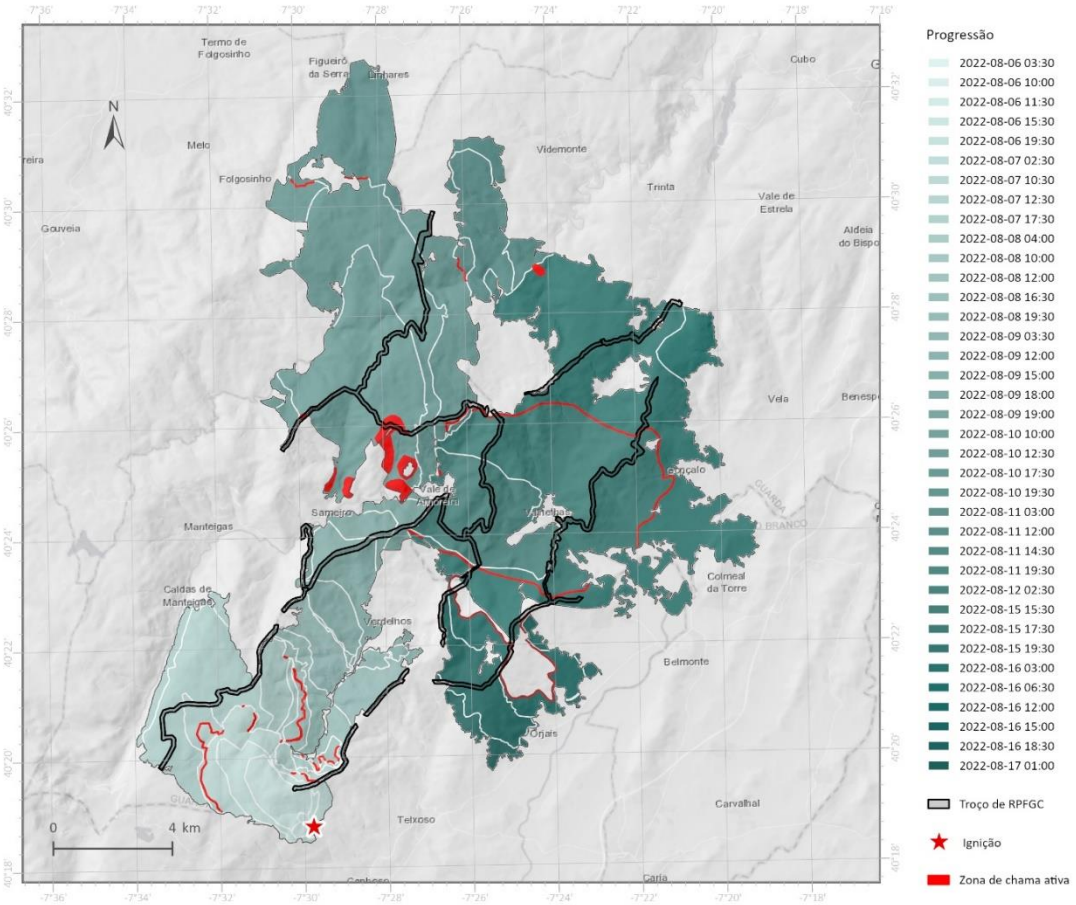
Anexo 7 - 1: Validação do contacto do incêndio de Garrocho com um troço de RPFGC, com recurso a imagem Sentinel 2 através da comparação entre compósitos RGB em (a) cor verdadeira (b) em falsa cor



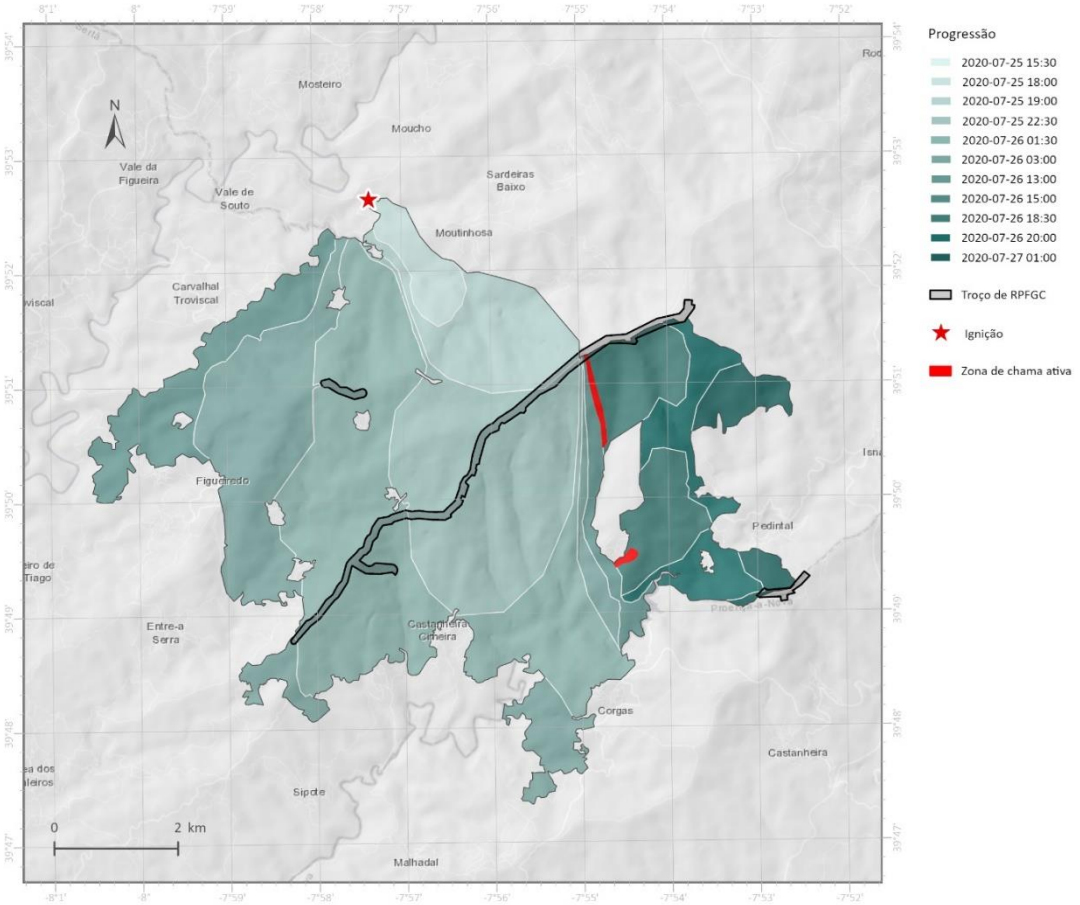
Anexo 7 - 2: Validação do contacto do incêndio de Garrocho com um troço de RPFGC, com recurso a imagem Sentinel 2 através da comparação entre (a) compósito RGB em cor verdadeira e (b) NDVI



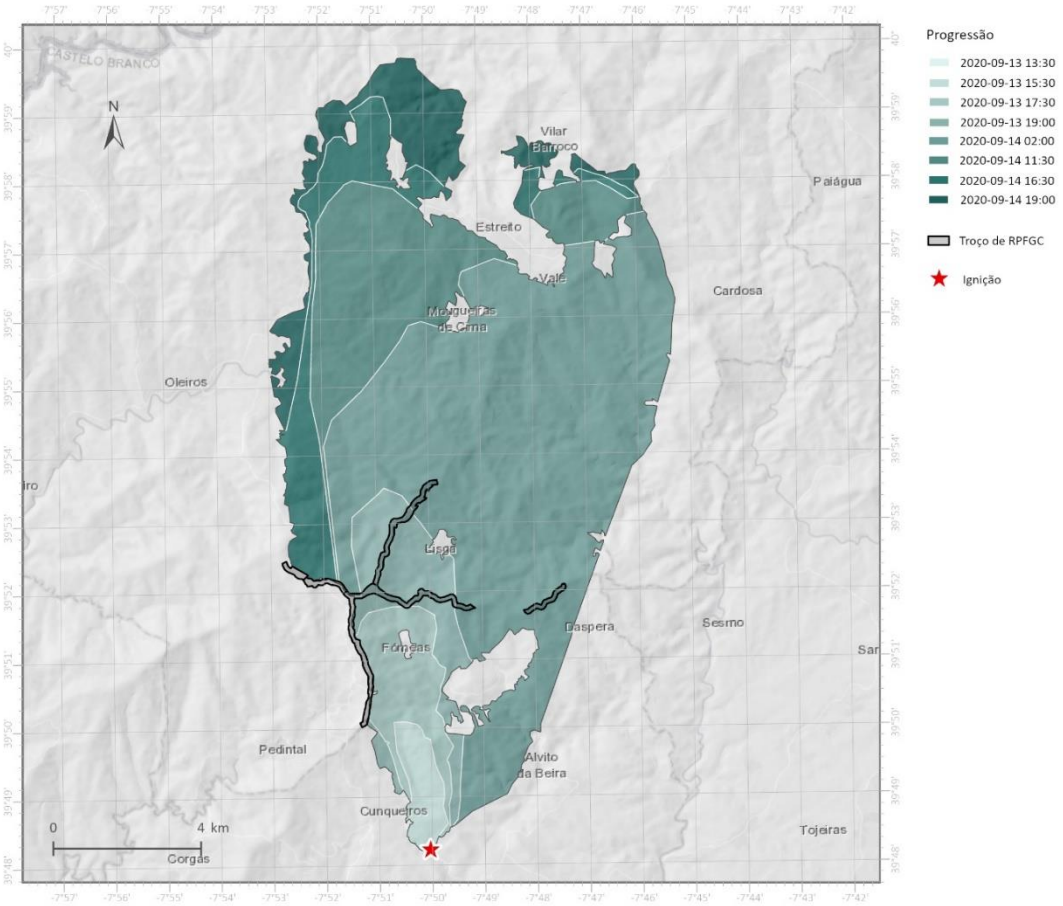
Anexo 8 - 1: Progressão do incêndio de Garrocho, entre 2022-08-06 03:30 e 2022-08-17 01:00



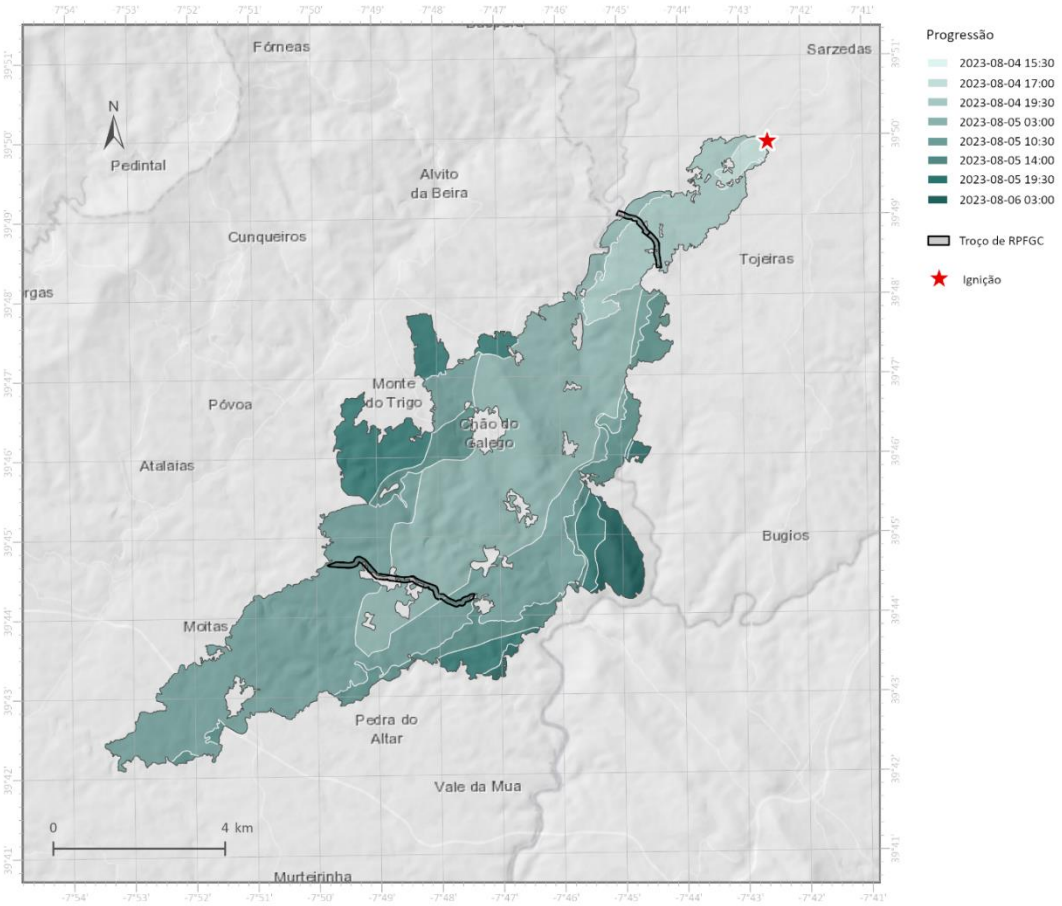
Anexo 8 - 2: Progressão do incêndio de Sardeiras de Baixo, entre 2020-07-25 15:30 e 2020-07-27 01:00



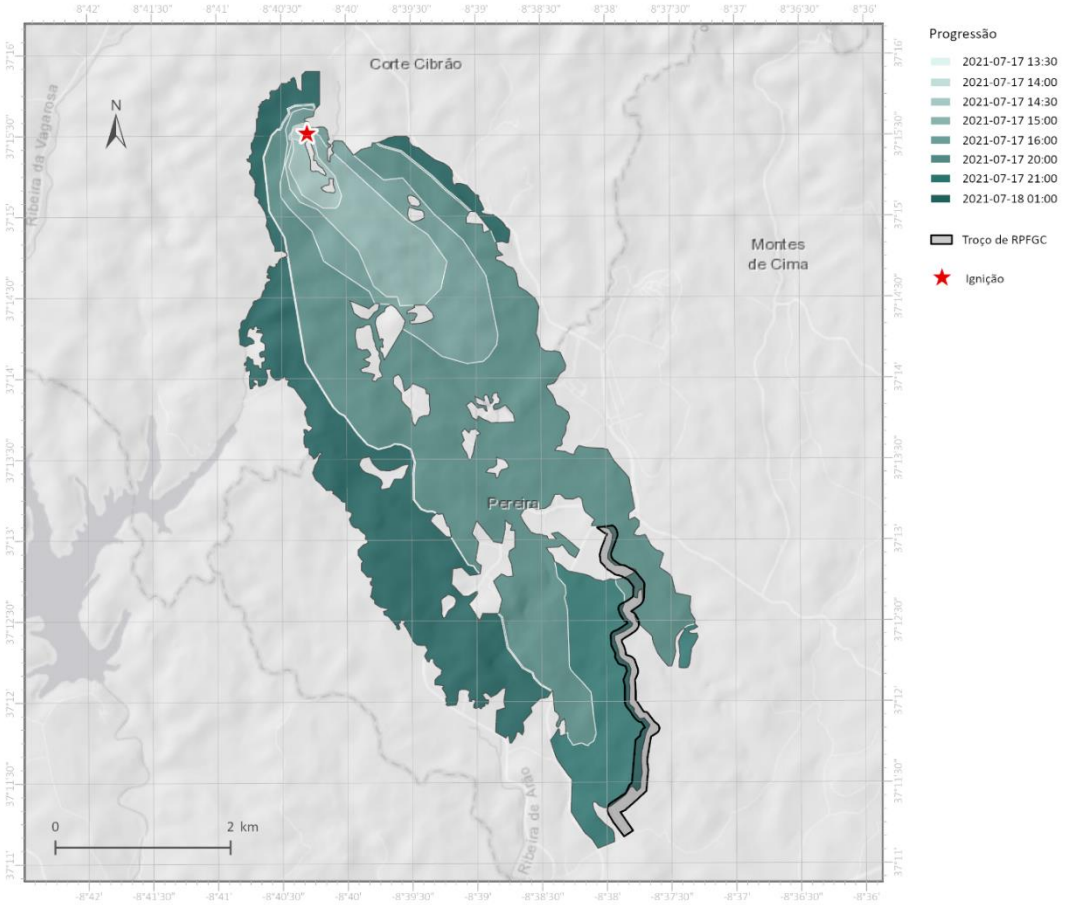
Anexo 8 - 3: Progressão do incêndio de Conqueiros, entre 2020-09-13 13:30 e 2020-09-14 19:00



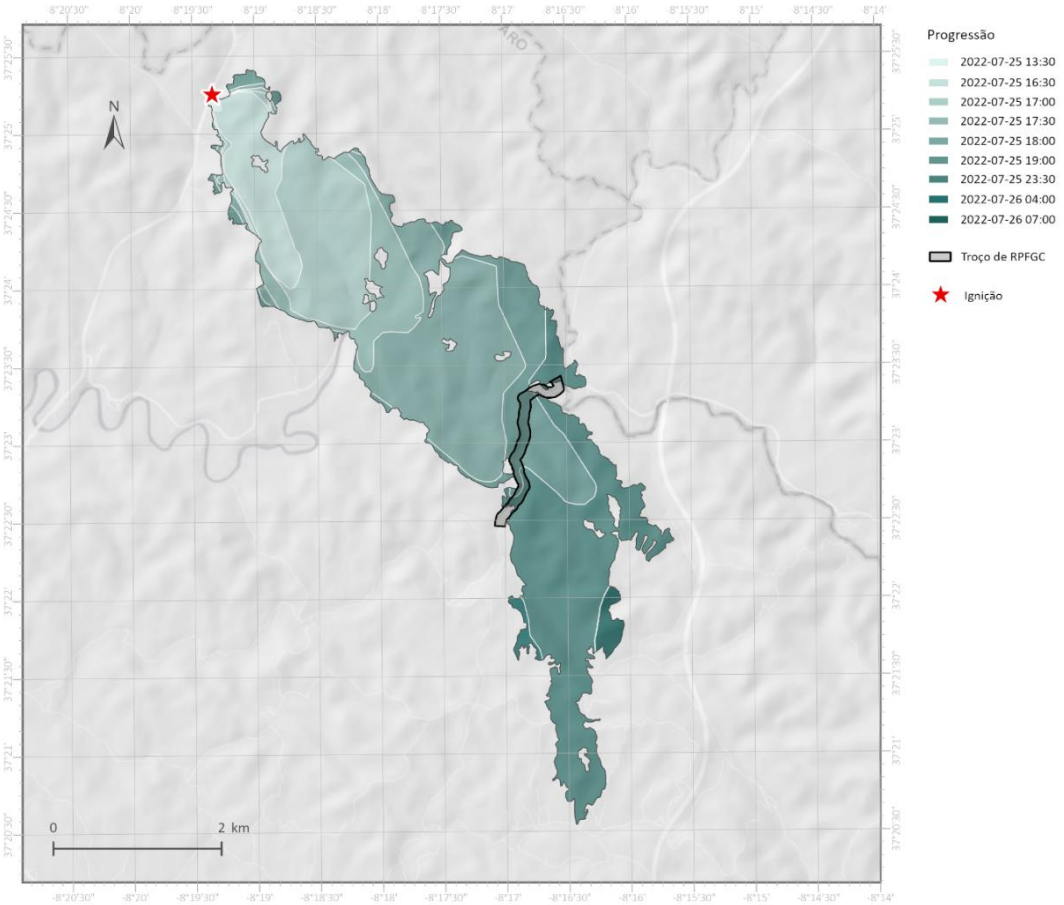
Anexo 8 - 4: Progressão do incêndio de Carrascal, entre 2023-08-04 15:30 e 2023-08-06 03:00



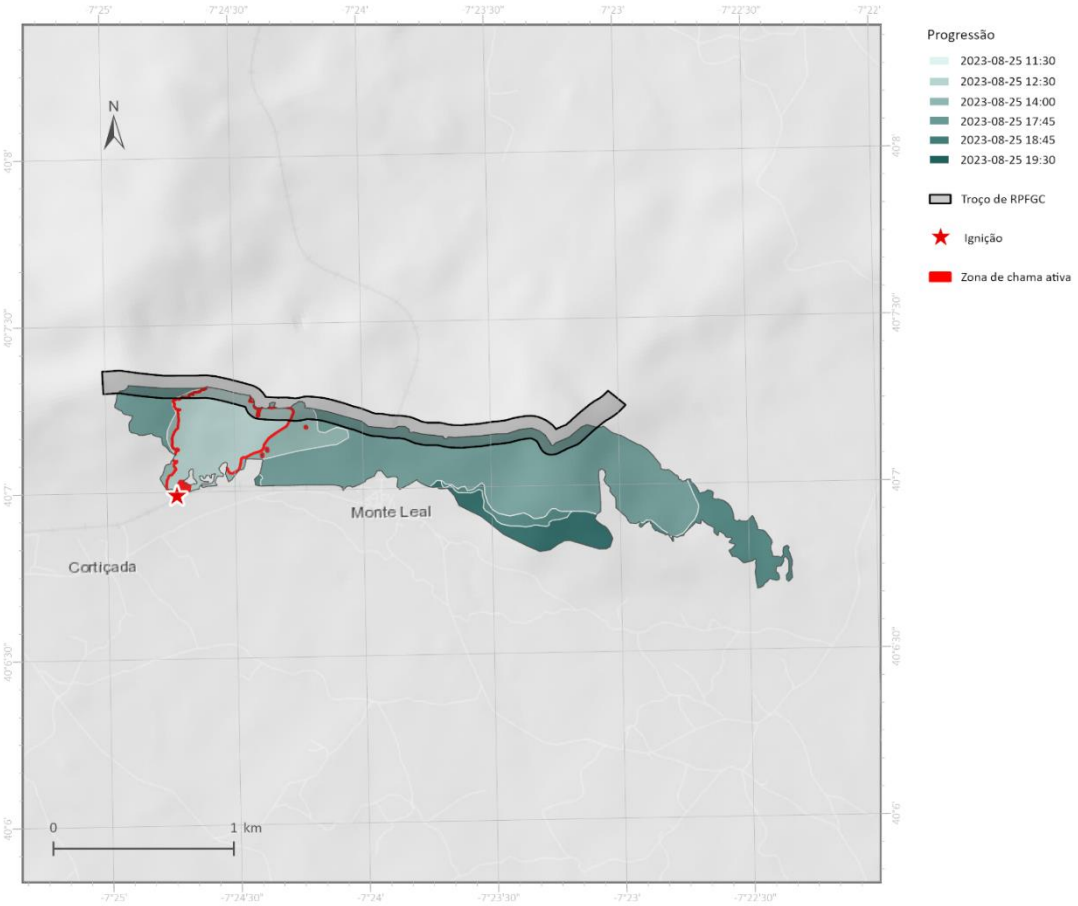
Anexo 8 - 5: Progressão do incêndio de Monchique, entre 2021-07-17 13:30 e 2021-07-18 01:00



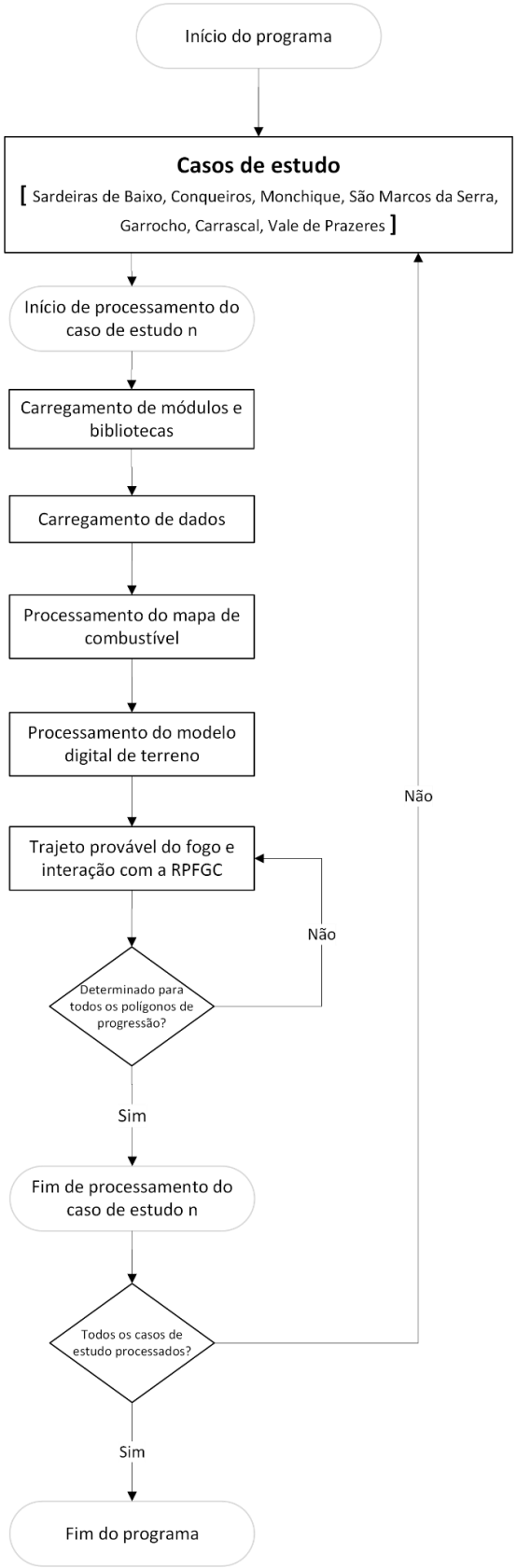
Anexo 8 - 6: Progressão do incêndio de São Marcos da Serra, entre 2022-07-25 13:30 e 2022-07-26 07:00



Anexo 8 - 7: Progressão do incêndio de Vale de Prazeres, entre 2023-08-25 11:30 e 2023-08-25 19:30



Anexo 9: Fluxograma da execução do programa de identificação e caracterização das interseções dos casos de estudo com a RPFGC



Anexo 10: Descrição e aplicação dos modelos de combustível adotados para modelação de comportamento do fogo (Fernandes et al., 2009)

Grupo	Modelo	Descrição do complexo combustível	Aplicação
Folhada (F)	F-RAC	Folhada muito compacta de coníferas com agulha curta. Carga de combustível fino: 4-6 (t/ha)	Povoamentos de *Pseudotsuga*, *Cedrus*, *Cupressus*, *Chamaecyparis*, *Pinus sylvestris*, *P. nigra*. Formações maduras de *Acacia dealbata*.
	F-FOL	Folhada compacta de folhosas com folha caduca ou perene. Carga de combustível fino: 2-5 (t/ha)	Povoamentos de carvalho, castanheiro, vidoeiro e faia. Sobreiral e azinhal densos, medronhal e acacial (excepto *A. dealbata*).
	F-PIN	Folhada de pinhais de agulha média a longa. Carga de combustível fino: 4-7 (t/ha)	Pinhais de *P. pinaster, P. pinea, P. halepensis, P. radiata*.
	F-EUC	Folhada de eucalipto. Carga de combustível fino: 4-6 (t/ha)	Eucaliptal.
Folhada e vegetação (M)	M-CAD	Folhada de folhosas caducifólias com sub-bosque arbustivo, usualmente com bastante combustível vivo. Carga de combustível fino: 8-17 (t/ha)	Povoamentos de carvalho, castanheiro, vidoeiro e faia.
	M-ESC	Folhada de folhosas esclerófilas com sub-bosque arbustivo. Carga de combustível fino: 7-17 (t/ha)	Sobreiral e azinhal.
	M-PIN	Folhada de pinheiro de agulha média a longa com sub-bosque arbustivo. Carga de combustível fino: 8-18 (t/ha)	Pinhais de *P. pinaster, P. pinea, P. halepensis, P. radiata*.

	M-EUC	Folhada de eucalipto com sub-bosque arbustivo. Carga de combustível fino: 9-18 (t/ha)	Eucaliptal.
	M-EUCd	Folhada descontínua de eucalipto com ou sem sub-bosque arbustivo nas linhas de plantação. Carga de combustível fino: 1-4 (t/ha)	Eucaliptal jovem ou recentemente gradado.
	M-H	Folhada com sub-bosque herbáceo. Carga de combustível fino: 2-5 (t/ha)	Povoamentos florestais, independentemente da espécie.
	M-F	Folhada com sub-bosque de fetos. Carga de combustível fino: 6-9 (t/ha)	Povoamentos florestais, independentemente da espécie.
Vegetação (V)	V-MAb	Mato baixo (<1 m) com bastante combustível morto e/ou fino. Carga de combustível fino: 7-14 (t/ha)	Matos e charnecas de urze, tojo, carqueja, zimbro. Povoamentos abertos ou jovens, independentemente da espécie, com estrato arbustivo constituído por aquelas espécies.
	V-MAa	Mato alto (>1 m) com bastante combustível morto e/ou fino. Carga de combustível fino: 12-27 (t/ha)	Matos de urze, tojo ou carqueja, ou giestal velho. Povoamentos abertos ou jovens, independentemente da espécie, com estrato arbustivo constituído por aquelas espécies. Regeneração natural densa de pinhal.
	V-MMb	Mato baixo (<1 m), com pouco combustível morto e/ou com folhagem relativamente grosseira. Carga de combustível fino: 4-8 (t/ha)	Matos de giesta, piorno. Matos de esteva, carrasco, zambujeiro, medronheiro, lentiscos e outras espécies mediterrânicas. Silvados. Povoamentos abertos ou jovens, independentemente da espécie, com estrato arbustivo constituído por aquelas espécies.

V-MMa	Mato alto (>1 m) com pouco combustível morto e/ou com folhagem relativamente grosseira. Carga de combustível fino: 10-19 (t/ha)	Matos de giesta, piorno. Matos de esteva, carrasco, zambujeiro, medronheiro, lentiscos e outras espécies mediterrânicas. Silvados. Povoamentos abertos ou jovens, independentemente da espécie, com estrato arbustivo constituído por aquelas espécies.
V-MH	Mato baixo (< 1 m) e verde, frequentemente descontínuo e com herbáceas.	Matos jovens, até 3 anos de idade desde o último fogo.
V-Hb	Erva baixa (<0,5 m). Carga de combustível fino: 1-1 (t/ha)	Arrelvados, prados, pastagens, pousios recentes. Restolhos. Montados.
V-Ha	Erva alta (>0,5 m). Carga de combustível fino: 2-4 (t/ha)	Arrelvados, prados, pastagens, pousios recentes. Cereais. Juncais. Montados.

Anexo 11: Tabela de parâmetros dos modelos de combustível adotados para modelação de comportamento do fogo (Fernandes et al., 2009)

	Espess.	Carga (t ha^{-1})					SVR (m^{-1})			PC	Hx
Modelo	**(m)**	**1hr**	**10hr**	**100hr**	**arb.**	**herb.**	**1hr**	**herb.**	**arb.**	**(kJ kg^{-1})**	**(%)**
F-RAC	0,05	3,75	2	1	1,18	0	6500	-	4500	20500	28
F-FOL	0,15	2,67	1,27	0,69	1,16	0	4500	-	5000	20500	25
F-PIN	0,1	6,5	1,5	0	0	0	5500	-	-	20500	45
F-EUC	0,32	4,63	2,96	1,27	1,12	0	4200	-	5000	21000	26
M-CAD	0,63	4,54	1,87	0,61	9,08	0	6000	-	5000	20000	30
M-ESC	0,5	5,65	1,5	0,48	7,89	0	5000	-	5500	20500	25
M-PIN	0,5	7,21	3	0	6,89	0	5500	-	6000	21000	40
M-EUC	0,64	8,37	3,81	0	4,51	0	4700	-	5000	21000	32
M-EUCd	0,4	1,37	2,89	1,59	1,84	0	4500	-	5000	21000	26
M-H	0,1	2,71	1	0	0,1	0,66	5500	8000	4500	20500	30
M-F	0,3	4,5	1,5	0,5	0,48	2,35	6000	8000	4500	19500	35
V-MAb	0,5	6	0,5	0	7,5	0	4500	-	4500	21000	35
V-MAa	1,05	9,5	2,5	0	14,5	0	3500	-	4000	21000	35
V-MMb	0,9	4	0,5	0	7	0	3000	-	3000	20500	20
V-MMa	1,7	6	4	0	13	0	2500	-	3000	20500	25
V-MH	0,55	1	1	0	5,5	1,5	4500	8500	4000	19500	25
V-Hb	0,35	0,3	0	0	0	1,2	6000	6000	-	19000	24
V-Ha	0,6	0,65	0,15	0	0,4	2,35	4000	5500	4000	19000	24

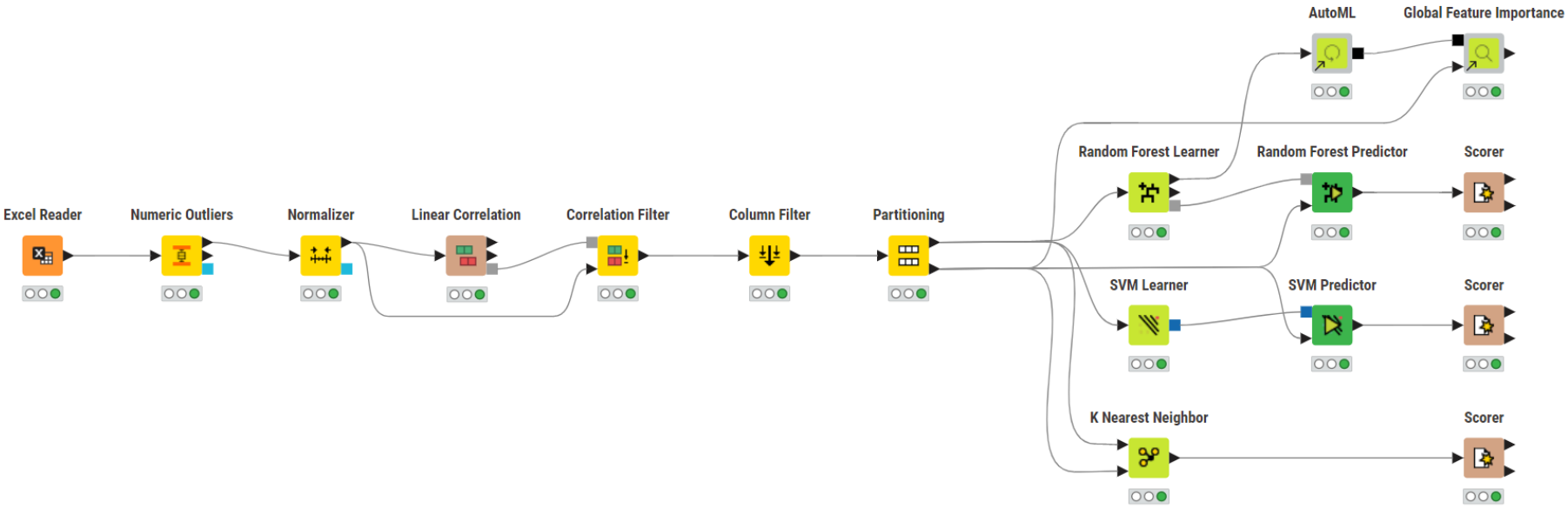
Espess. – Espessura; SVR – relação entre superfície e volume;

PC – conteúdo calorífico; Hx – humidade de extinção do combustível 1hr.

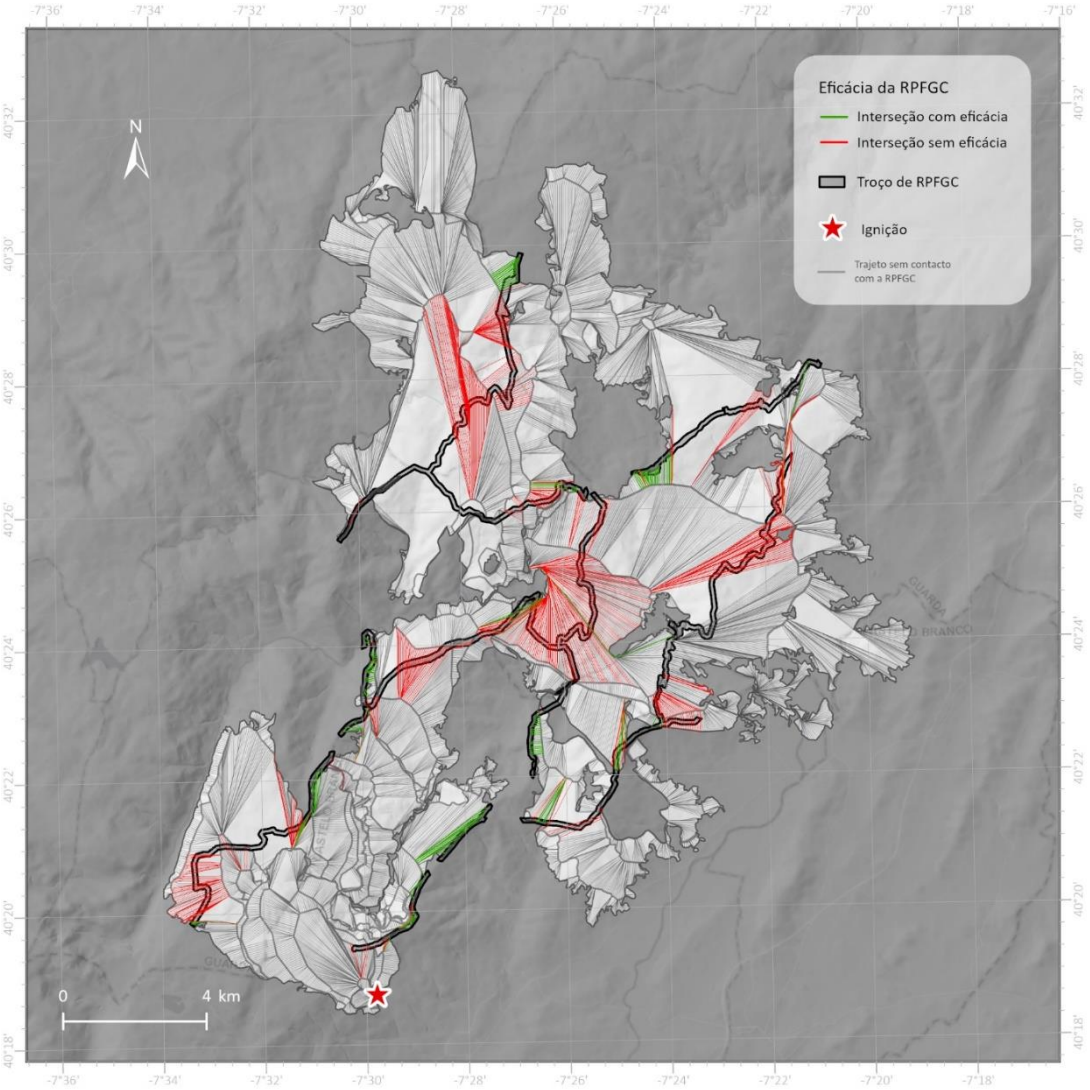
Anexo 12: Classes de FWI com correspondência ao comportamento do fogo (IPMA, s.d.)

FWI	Classes de perigo	Tipologia de incêndios possíveis de ocorrer
< 8,2	Baixo	Incêndios de superfície.
8,2 – 17,2	Moderado	
17,2 – 24,6	Alto	Incêndios com grande intensidade, incluindo incêndios de copas.
24,6 – 38,3	Muito alto	
38,3 – 50,1	Máximo	Incêndio com intensidade extrema, com propagação de copas ativa, projeções e elevada dificuldade na supressão.
50,1 - 64	Extremo	Incêndios com intensidade excecional, extrema dificuldade na supressão.
> 64	Excecional	

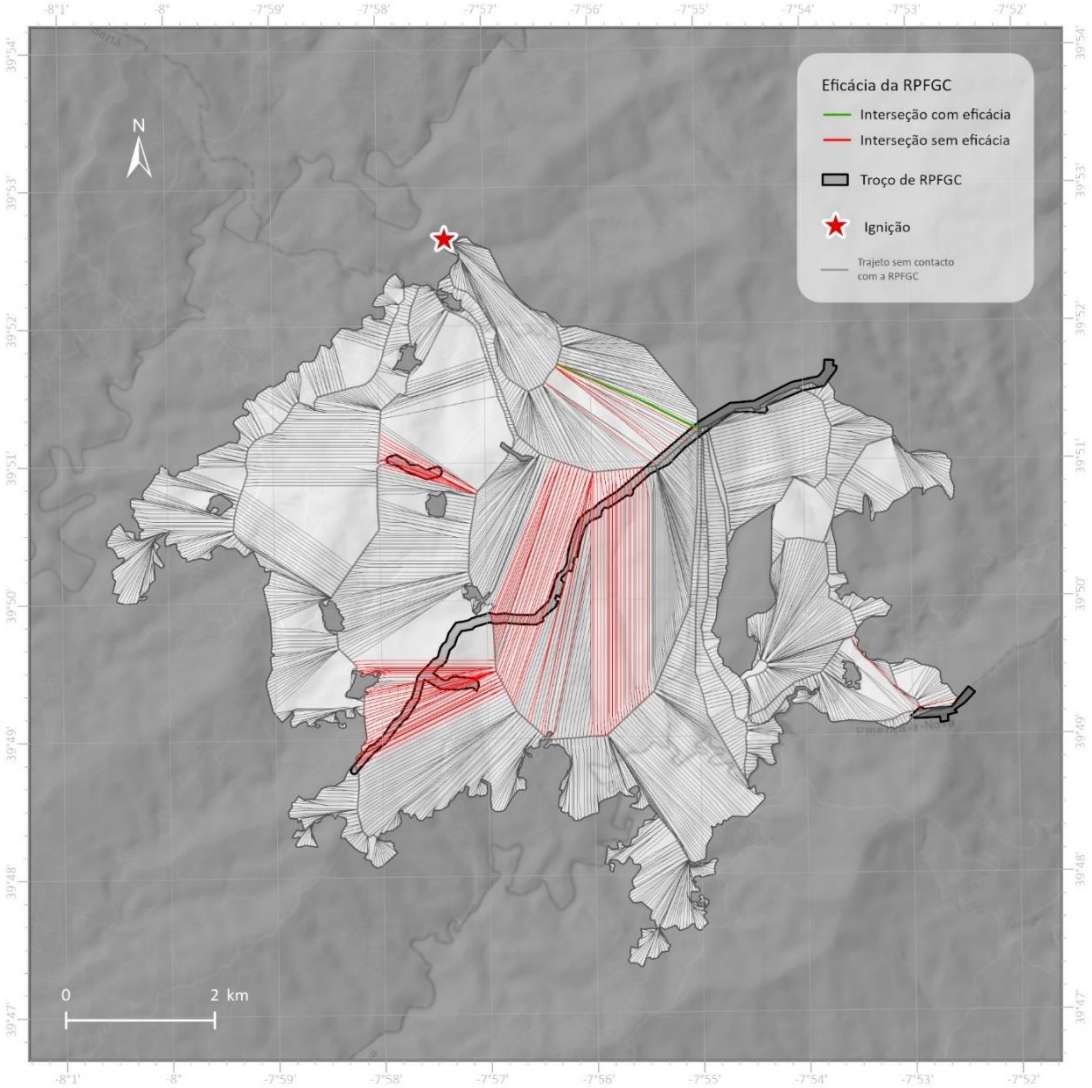
Anexo 13: Fluxo de processamento do conjunto de dados para classificação automática da eficácia no *Knime Analytics Platform*



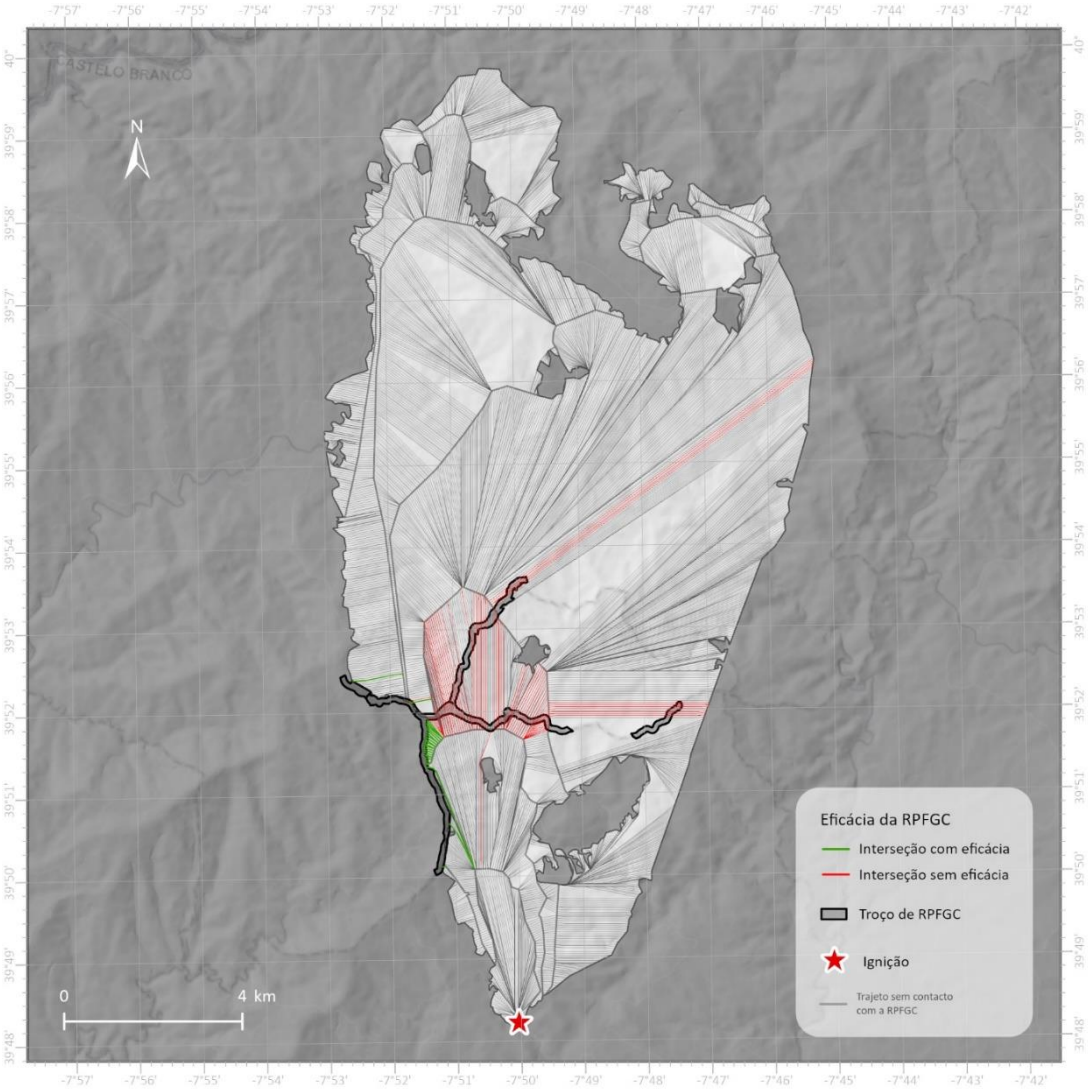
Anexo 14 - 1: Mapa de verificação da eficácia da RPFGC no incêndio de Garrocho



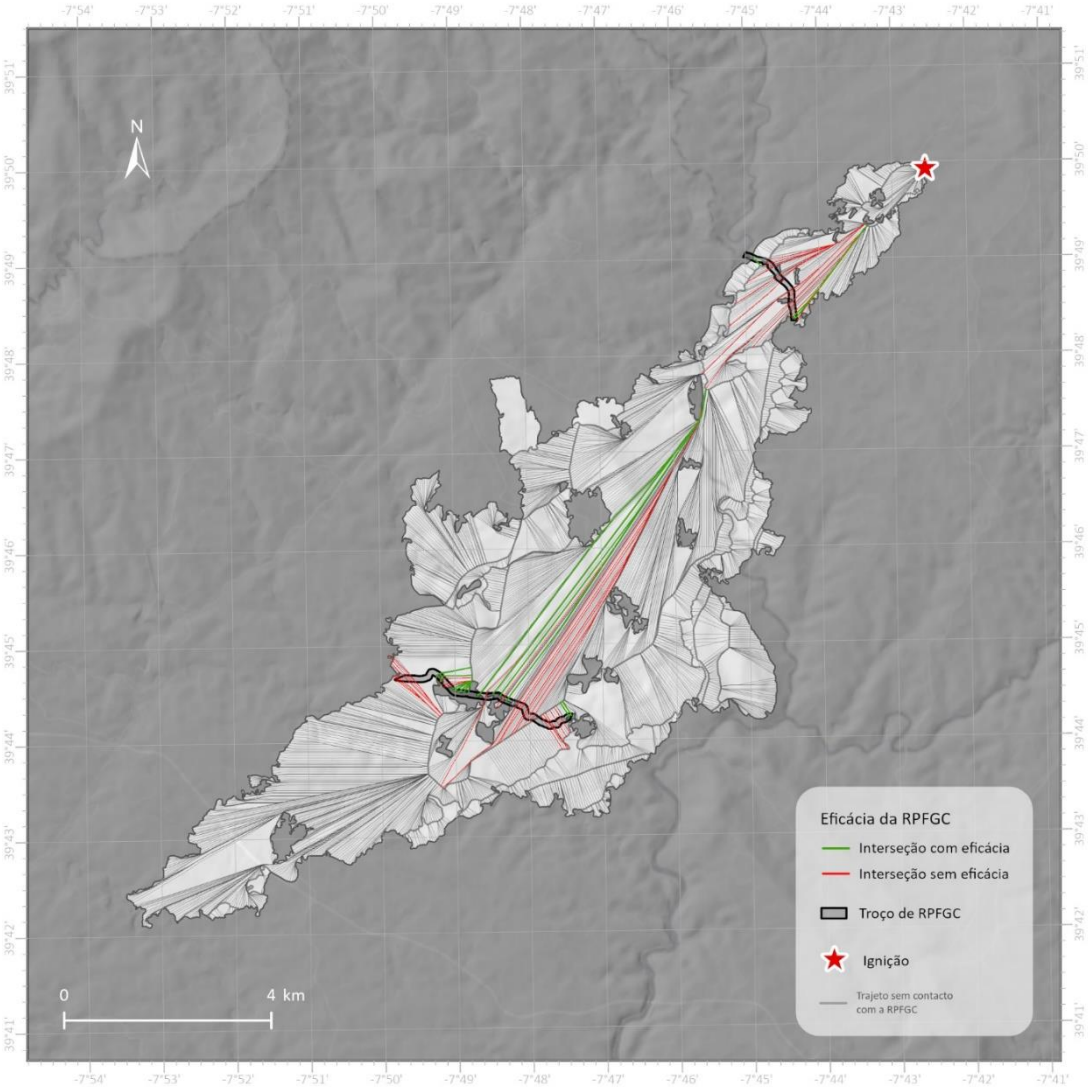
Anexo 14 - 2: Mapa de verificação da eficácia da RPFGC no incêndio de Sardeiras de Baixo



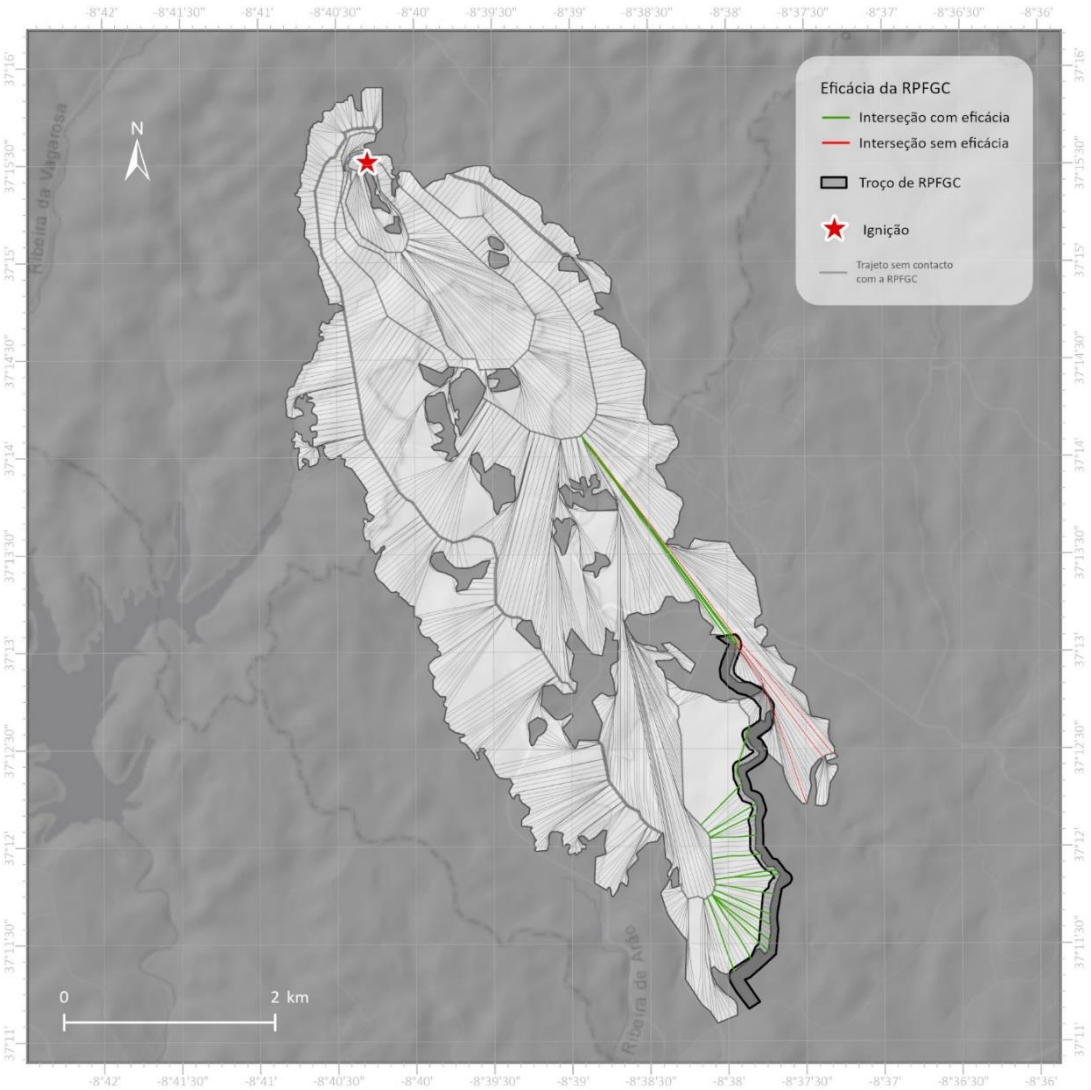
Anexo 14 - 3: Mapa de verificação da eficácia da RPFGC no incêndio de Conqueiros



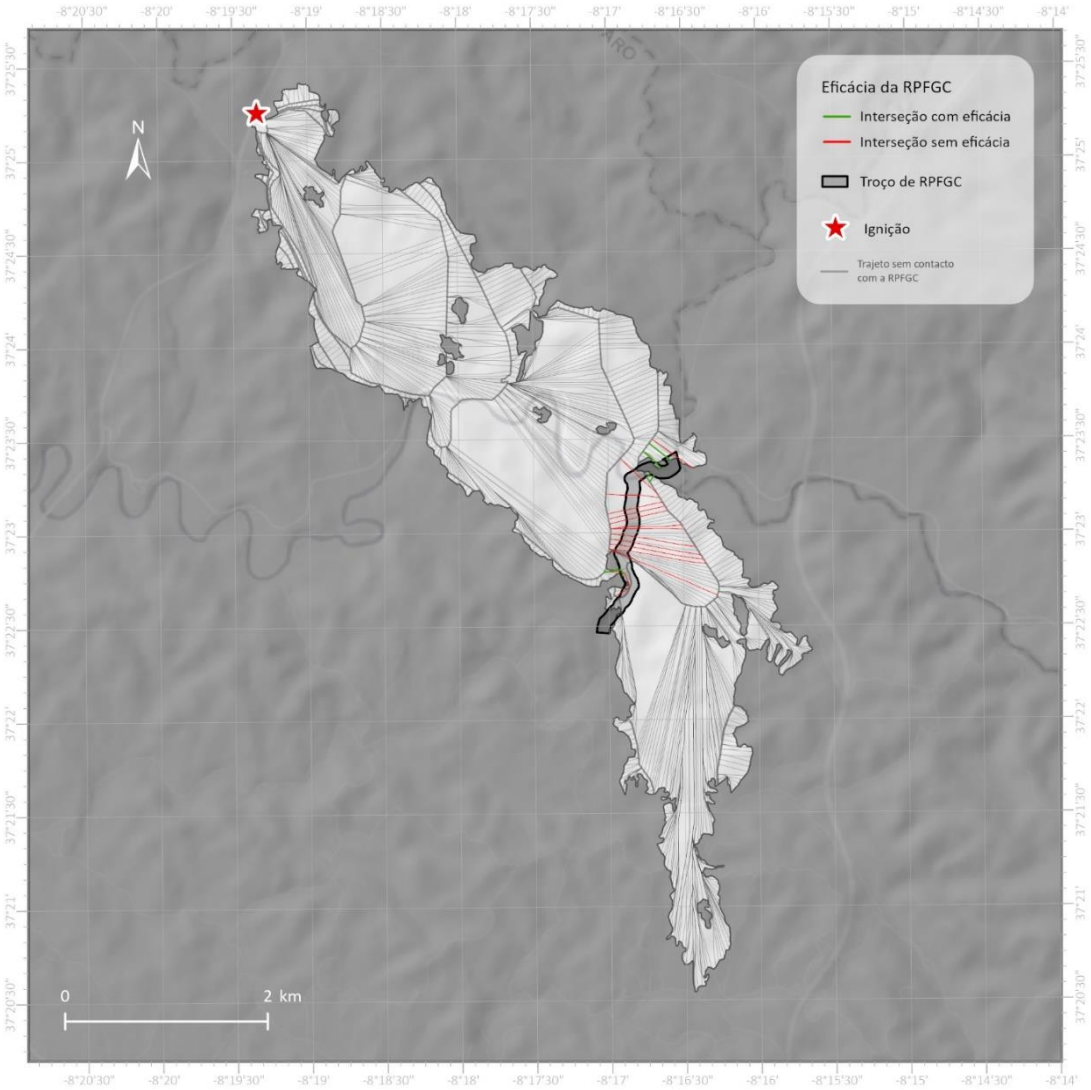
Anexo 14 - 4: Mapa de verificação da eficácia da RPFGC no incêndio de Carrascal



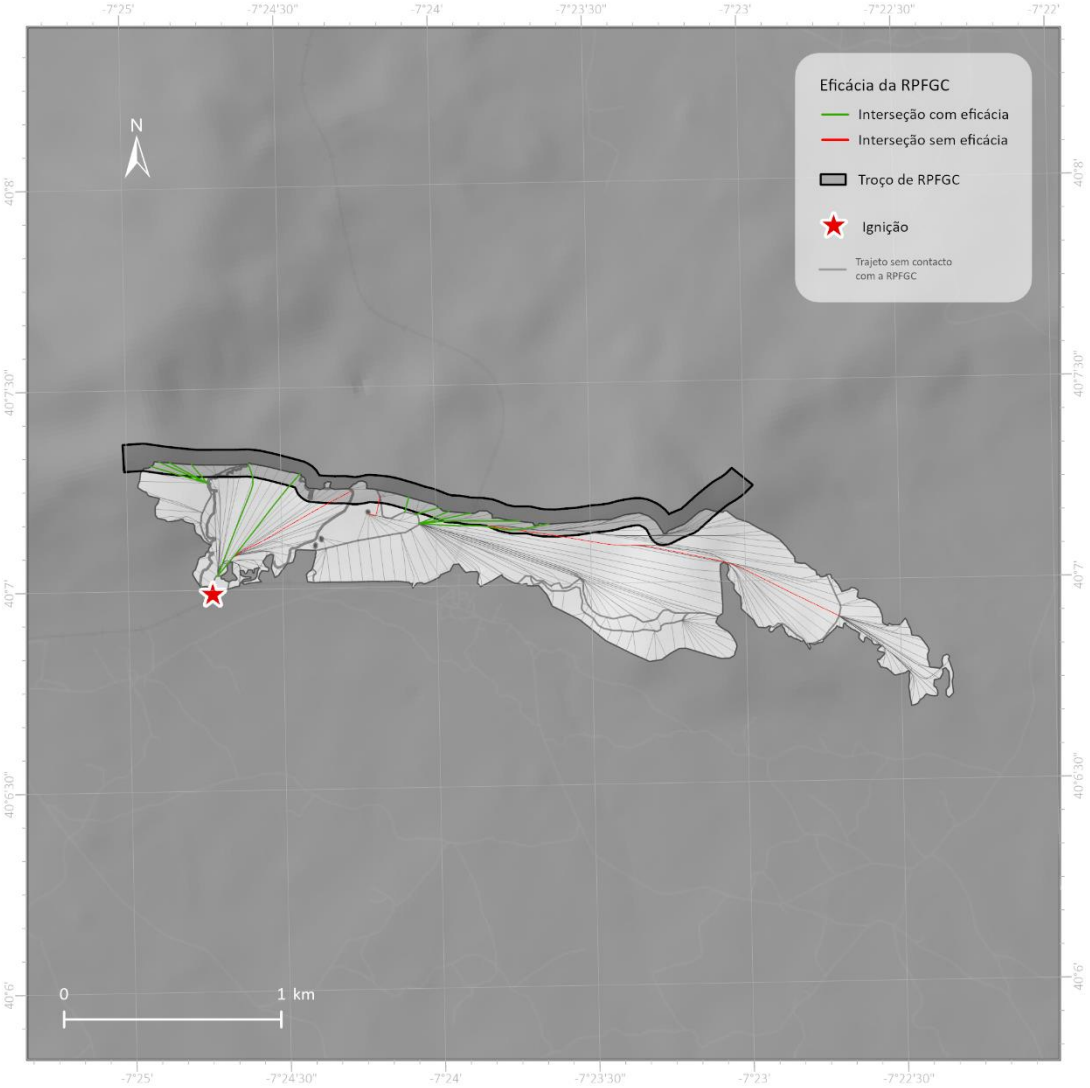
Anexo 14 - 5: Mapa de verificação da eficácia da RPFGC no incêndio de Monchique



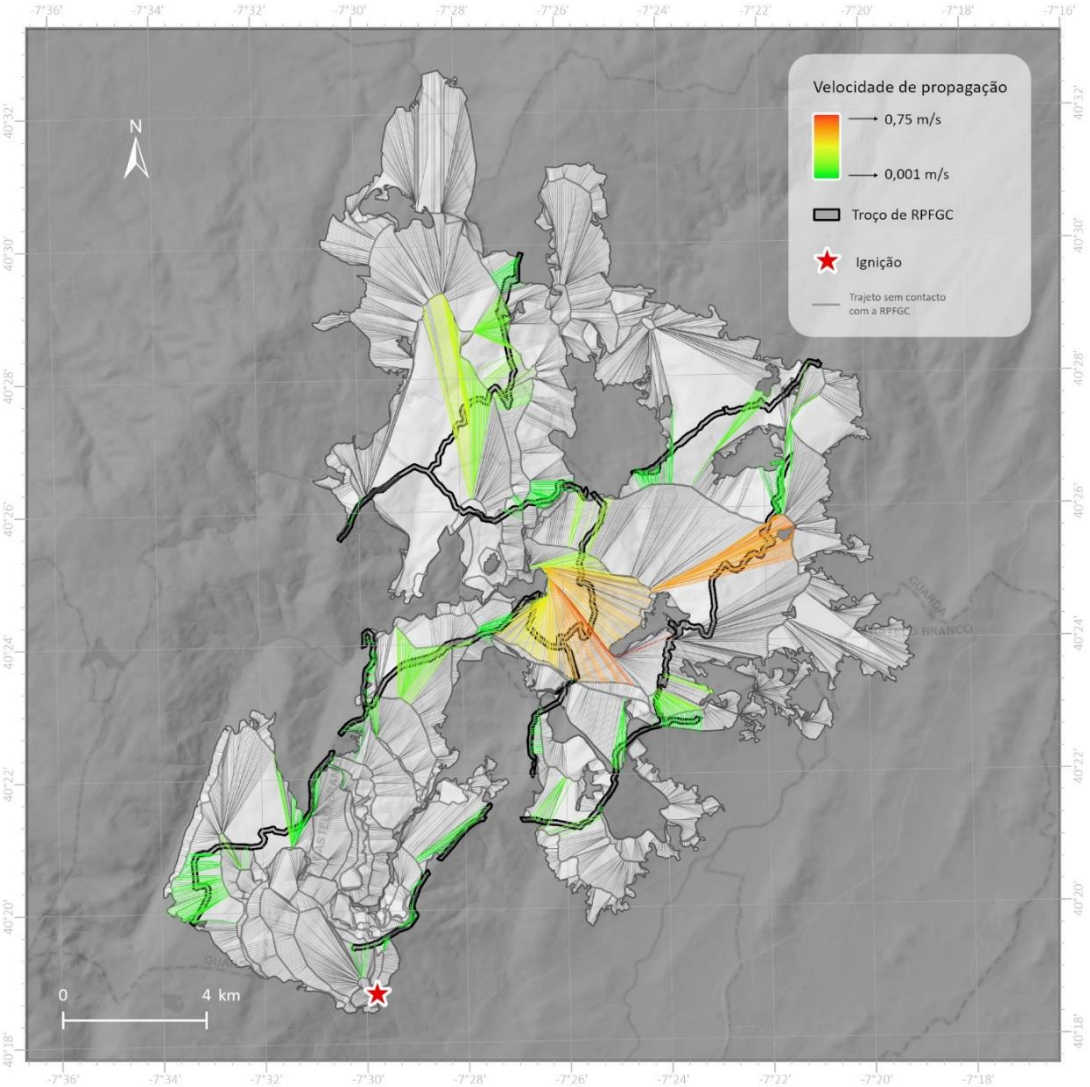
Anexo 14 - 6: Mapa de verificação da eficácia da RPFGC no incêndio de São Marcos da Serra



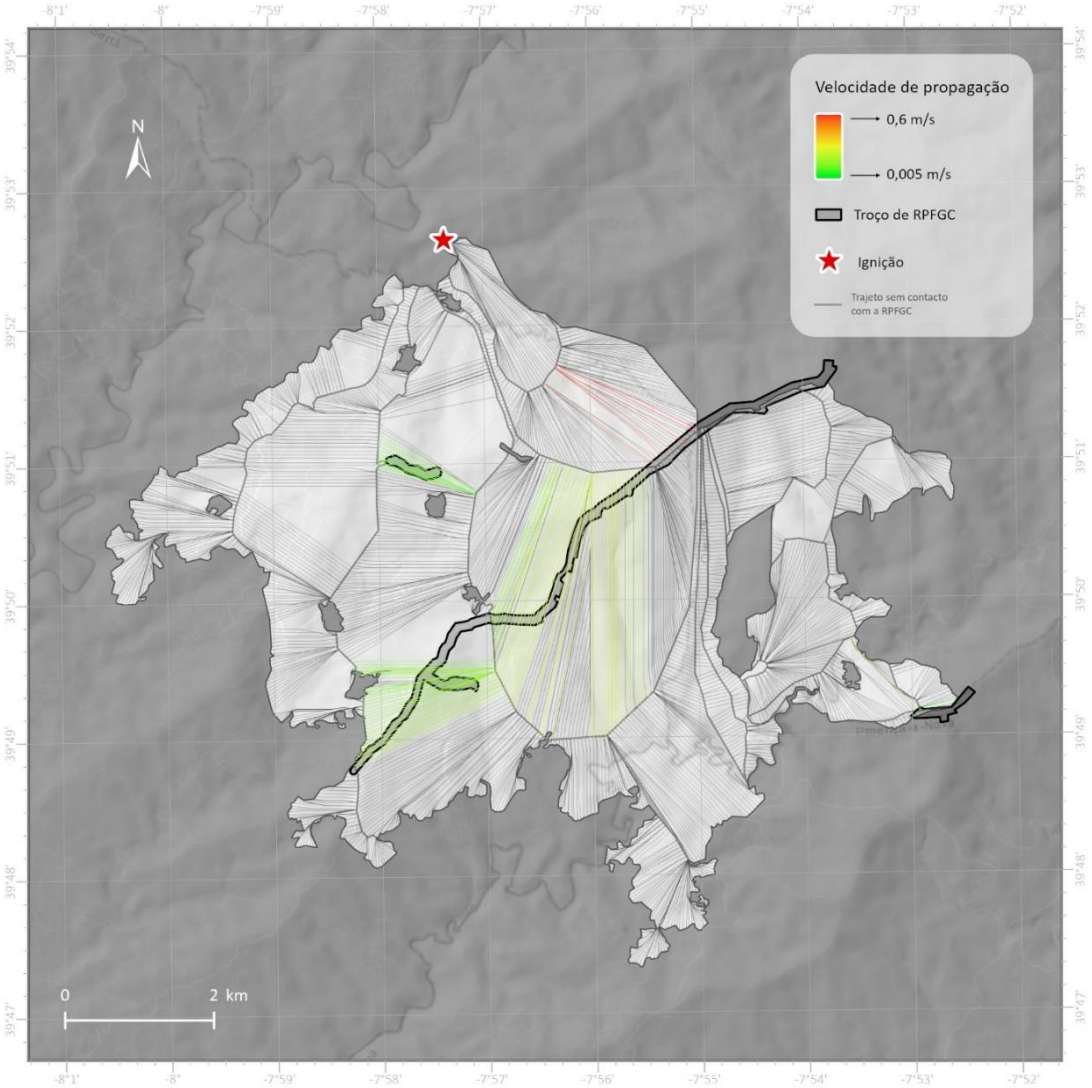
Anexo 14 - 7: Mapa de verificação da eficácia da RPFGC no incêndio de Vale de Prazeres



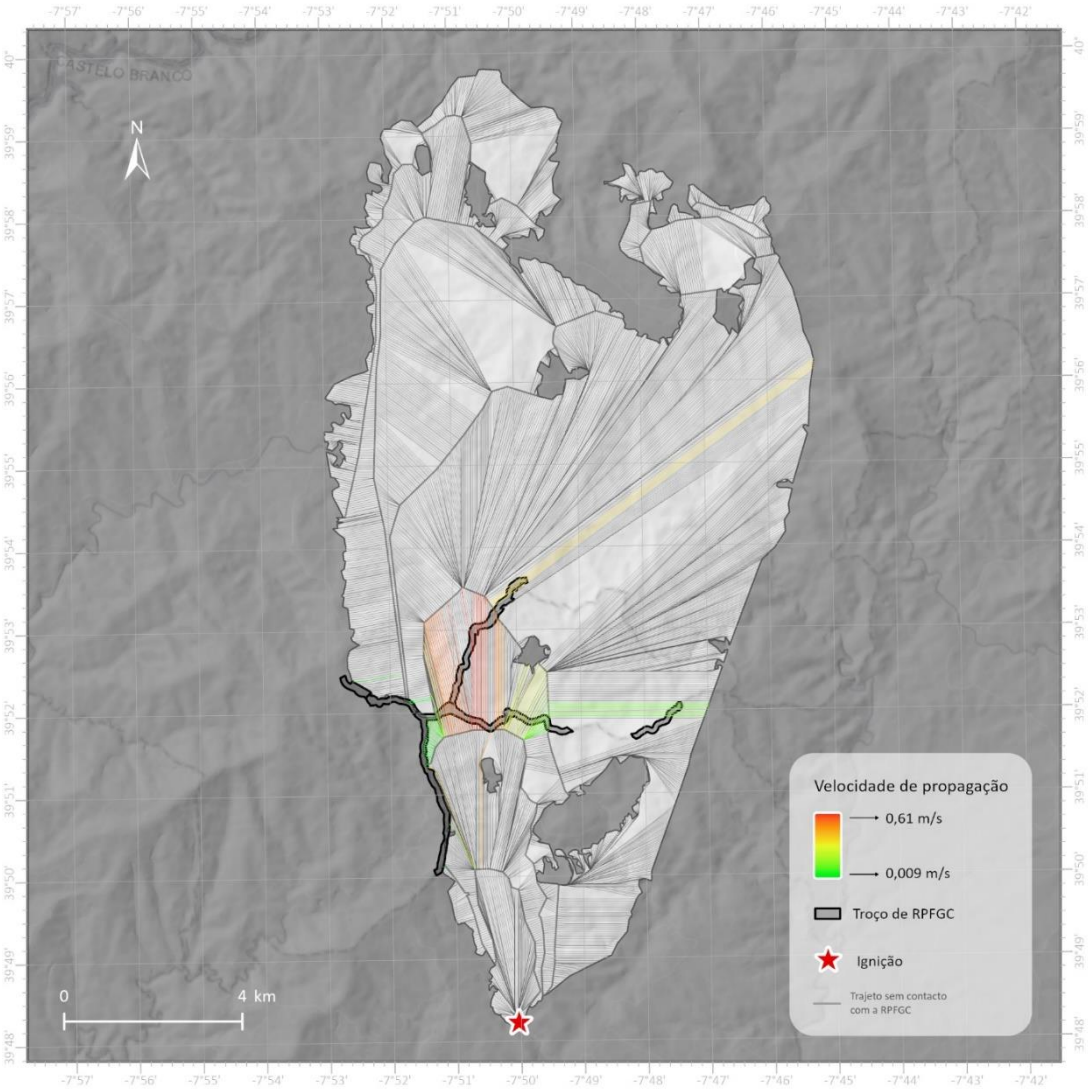
Anexo 15 - 1: Mapa da velocidade de propagação estimada por interseção no incêndio de Garrocho



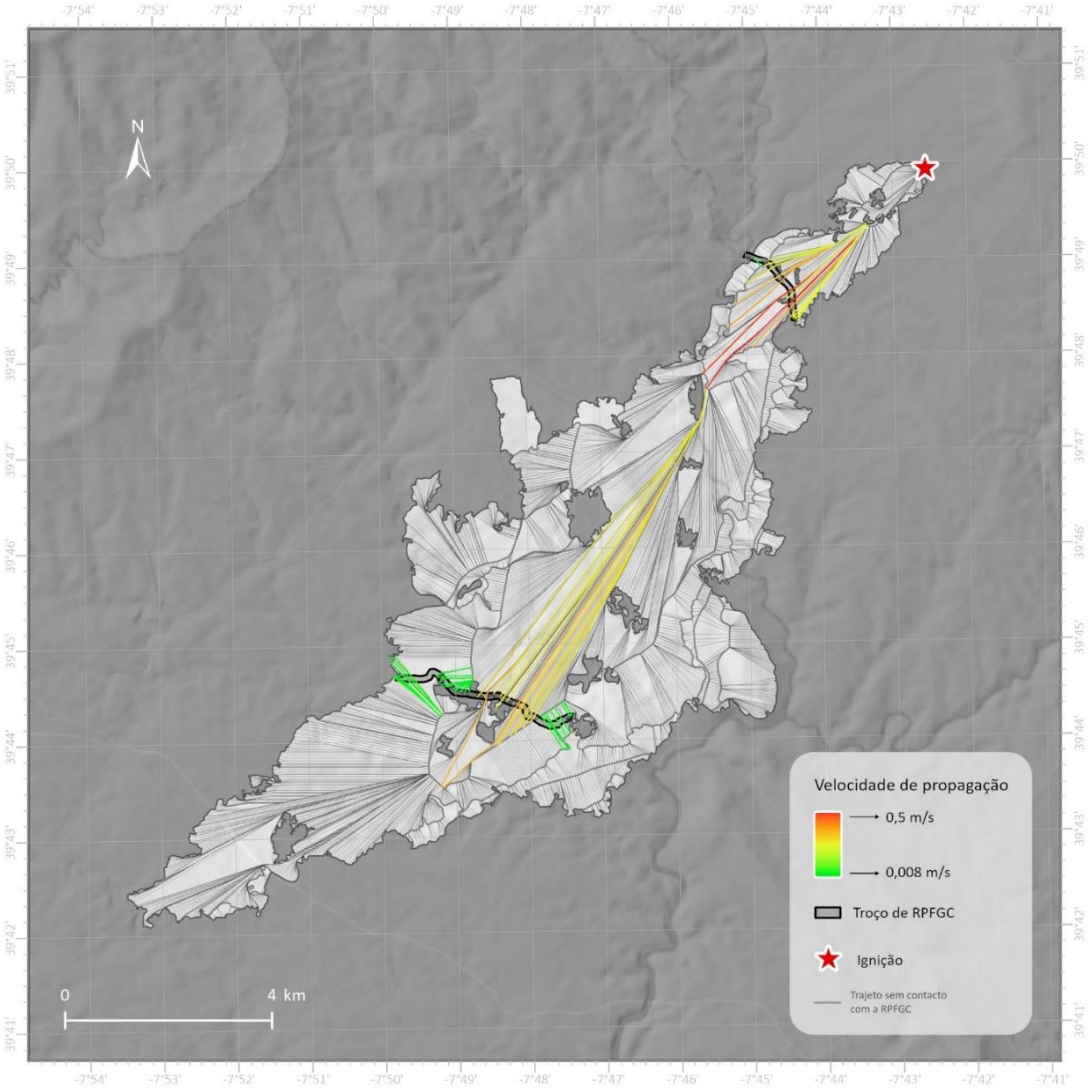
Anexo 15 - 2: Mapa da velocidade de propagação estimada por interseção no incêndio de Sardeiras de Baixo



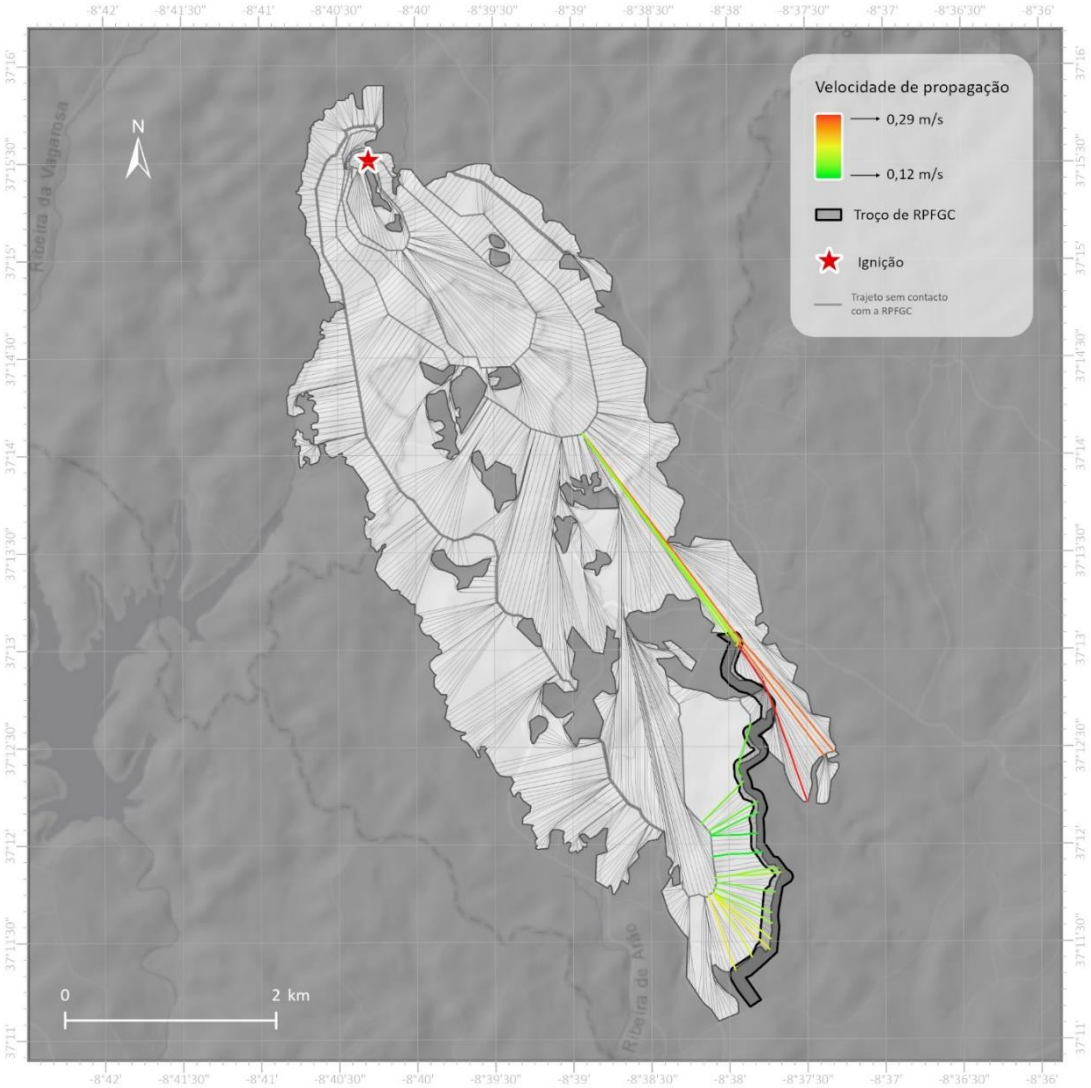
Anexo 15 - 3: Mapa da velocidade de propagação estimada por interseção no incêndio de Conqueiros



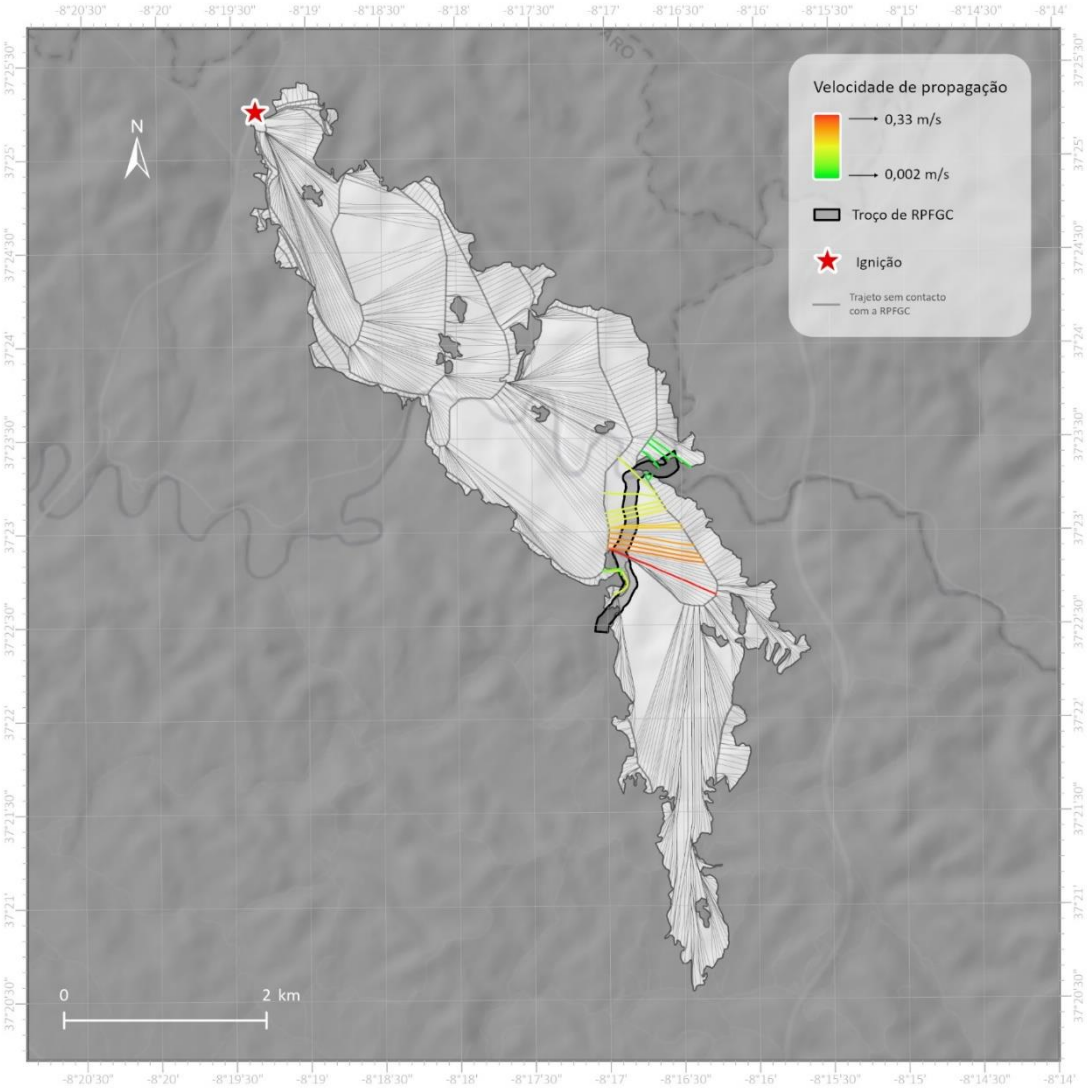
Anexo 15 - 4: Mapa da velocidade de propagação estimada por interseção no incêndio de Carrascal



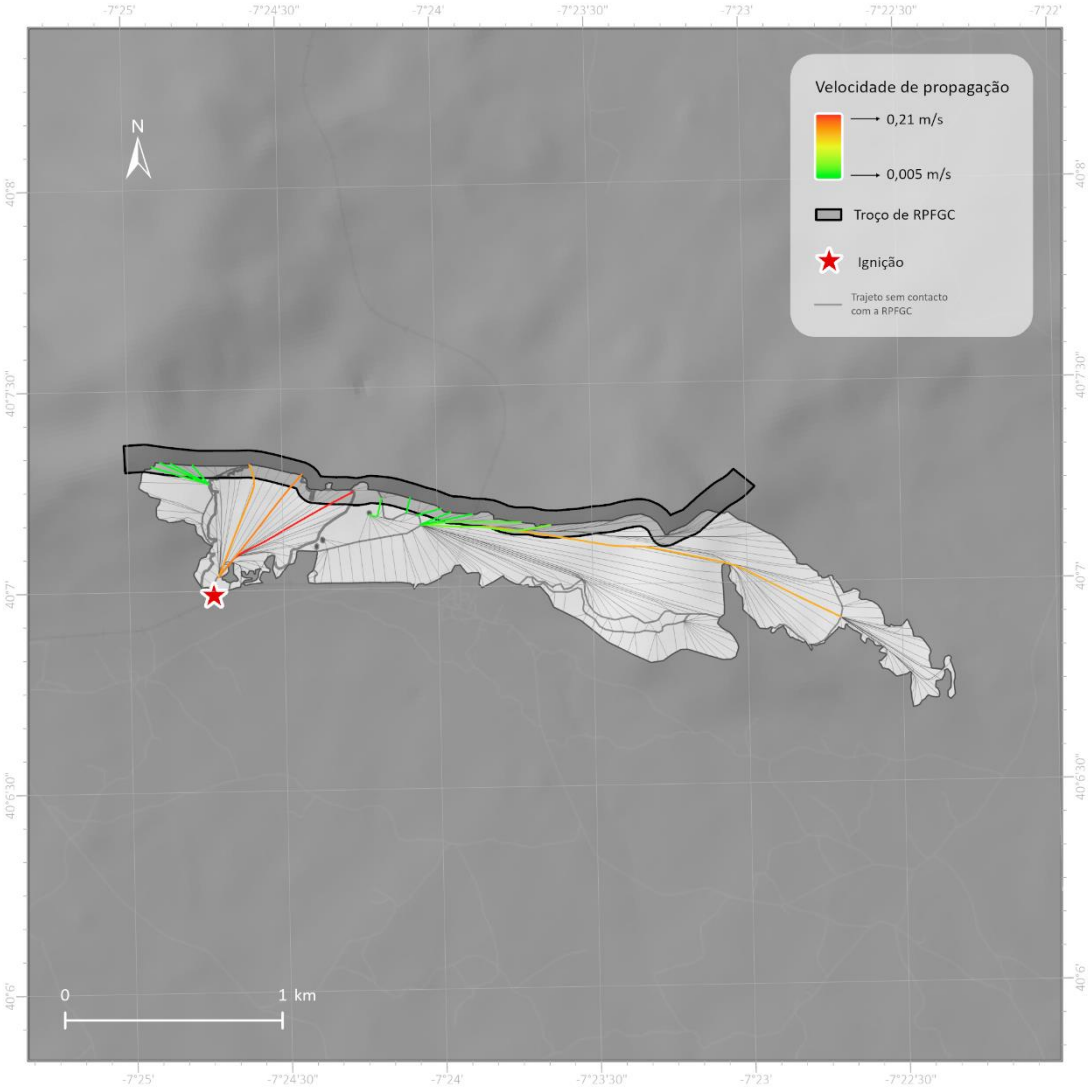
Anexo 15 - 5: Mapa da velocidade de propagação estimada por interseção no incêndio de Monchique



Anexo 15 - 6: Mapa da velocidade de propagação estimada por interseção no incêndio de São Marcos da Serra

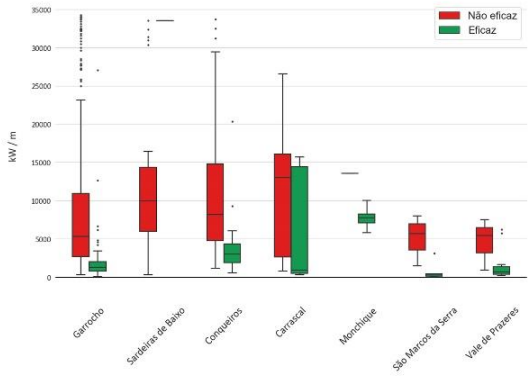


Anexo 15 - 7: Mapa da velocidade de propagação estimada por interseção no incêndio de Vale de Prazeres

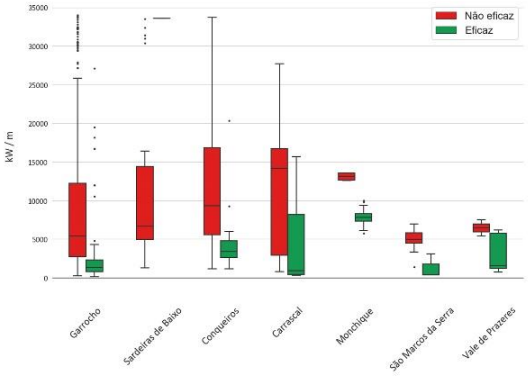


Anexo 16: Distribuição da intensidade da frente de chamas estimada na interseção e a múltiplas distâncias, por caso de estudo e por eficácia verificada

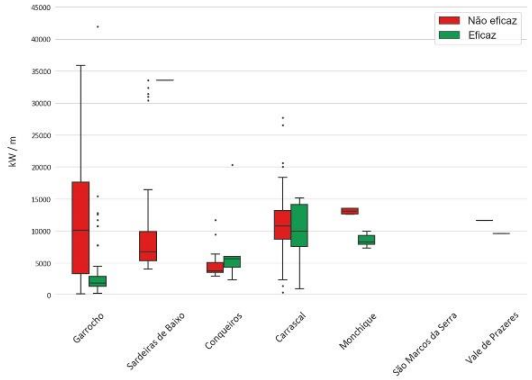
(a) intensidade na interseção



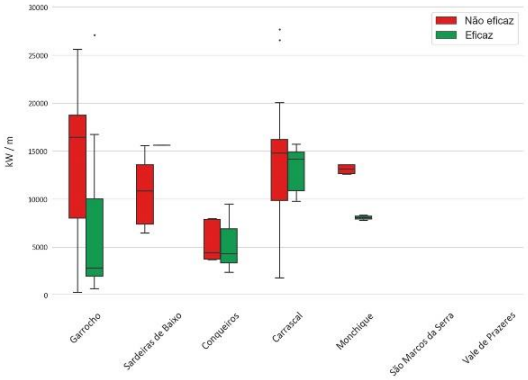
(b) intensidade a 100 m da interseção



(c) intensidade a 500 m da interseção



(d) intensidade a 1000 m da interseção



2024

Rede primária de faixas de gestão de combustível:
análise espacial à eficácia na contenção de incêndios rurais em Portugal

João Carlos Hermenegildo Oliveira

C&SIG

UNIGIS PT

NOVA IMS Information Management School