

MESTRADO EM SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA E ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO

Modelação da Severidade Potencial do Fogo em Incêndios Rurais no Alto Minho

Tiago Manuel Gonçalves Brito

M

2024/2025



Tiago Manuel Gonçalves Brito

Modelação da Severidade Potencial do Fogo em Incêndios rurais no Alto Minho

Dissertação realizada no âmbito do Mestrado em Sistemas de Informação Geográfica e Ordenamento do Território, orientada pela Professora Doutora Susana da Silva Pereira e pelo Professor Doutor Rafaello Costa Gomes Vieira Bergonse.

Faculdade de Letras da Universidade do Porto

2024/2025



Este trabalho está licenciado ao abrigo de uma licença CC BY 4.0

À minha Família e Amigos e

aos que não acreditaram, deixo aqui a prova de que os sonhos não pedem licença

Índice

Índice	1
Declaração de honra	3
Agradecimentos	4
Resumo.....	8
Abstract	9
Índice de Figuras	10
Índice de Tabelas.....	12
1.Introdução.....	13
1.1. Contexto e motivação	13
1.2. Questões de partida	15
1.3. Objetivo	16
1.4. Objetivos específicos.....	16
1.5. Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais	17
1.6. Redes de defesa.....	18
1.6.1. Rede Primária de Faixas de Gestão de Combustível	19
2.A avaliação da severidade dos incêndios rurais.....	21
2.1. Incêndios rurais	21
2.2. Fatores que influenciam o comportamento do fogo	22
2.2.1. Topografia	23
2.2.2. Meteorologia	24
2.2.3. Vegetação	25
2.3. Severidade	27
2.4. Modelos do comportamento do fogo	28
2.5. Simuladores do comportamento do fogo	30
2.6. Softwares de simulação do comportamento do fogo	31
2.6.1. FARSITE	31
2.6.1. BehavePlus.....	31
2.6.2. NEXUS	32
2.6.3. Visual Behave.....	32
2.6.4. FlamMap	33
2.6.5. Modelos de combustivel.....	34

2.6.6. Percentagem de cobertura de copas.....	36
3.Área de estudo: o Alto Minho	37
3.1. Caracterização geral	37
3.2. Morfologia e paisagem	38
3.3. Caraterização climática.....	42
3.4. Ocupação do solo e combustíveis florestais	45
3.5. Regime de fogo e histórico de incêndios rurais	53
3.6. Caracterização sociodemográfica.....	60
4.Metodologia.....	64
4.1. Recolha de Informação matricial e vetorial e preparação dos mapas de base.....	65
4.2. Construção das Paisagens Atual e Futuras.....	71
4.3. Simulação do comportamento básico do fogo para as diferentes paisagens.....	73
4.4. Classificação dos outputs	75
4.5. Criação das matrizes e dos modelos de severidade potencial do fogo.....	76
5.Resultados	78
5.1. Modelo de severidade dos incêndios rurais na paisagem atual	78
5.2. Severidade dos incêndios rurais em cenários de paisagem futura	81
6.Incertezas, limitações e recomendações futuras.....	88
6.1. Incertezas	88
6.2. Limitações.....	89
6.3. Recomendações futuras	90
7.Conclusões	91
Bibliografia	93
Bibliografia legislativa	95
Anexo 1 – Tabela de descrição dos modelos de combustível retirado de Sá <i>et al.</i> (2023).....	96
Anexo 2- Freguesias do Alto Minho	99

Declaração de honra

Declaro que a presente dissertação é de minha autoria e não foi utilizada previamente noutro curso ou unidade curricular, desta ou de outra instituição. As referências a outros autores (textos, trabalhos, ideias) respeitam escrupulosamente as regras de atribuição de autoria e encontram-se devidamente indicadas no texto e nas referências bibliográficas, de acordo com as normas de referenciação. Tenho consciência de que a prática de plágio e auto-plágio constitui um ilícito académico.

Declaro, ainda, que não utilizei ferramentas de inteligência artificial generativa (chatbots baseados em grandes modelos de linguagem) para realização de partes da presente dissertação, encontrando-se todas as interações (prompts e respostas) transcritas em anexo.

Porto, 31 de julho 2025

Tiago Brito

Agradecimentos

A realização desta dissertação foi possível graças ao apoio, incentivo e partilha generosa de conhecimento de muitas pessoas, às quais expresso minha mais profunda gratidão.

Agradeço à minha orientadora, Professora Doutora Susana da Silva Pereira, pela orientação, apoio e disponibilidade ao longo desta dissertação. A sua dedicação, paciência e sensibilidade foram fundamentais para a concretização deste trabalho. Sou especialmente grato pela forma atenta com que esclareceu as minhas dúvidas, inclusive as mais complexas e “existenciais”, bem como pelas críticas construtivas e conselhos que me ajudaram a desenvolver competências e a aprofundar conhecimentos. Sou também grato por todas as conversas sobre a vida e conselhos que a professora me deu ao longo de todo este ano, serão sempre conselhos e ensinamentos que irei levar no coração. Agradeço as vezes em que parou a minha “loucura”, bem como a motivação que foi essencial, sobretudo em momentos de grande preguiça e desafiantes ao longo deste percurso.

Agradeço também ao meu coorientador, Professor Doutor Rafaello Costa Gomes Vieira Bergonse, por ter aceitado o desafio de me acompanhar durante esta dissertação. A sua ajuda foi extremamente valiosa ao longo deste percurso. Agradeço a disponibilidade, a partilha de conhecimentos, a atenção com que respondeu às minhas dúvidas e as críticas construtivas que me permitiram aprender com os erros, melhorar as minhas capacidades e crescer academicamente.

Agradeço igualmente ao Professor Doutor António Alberto Teixeira Gomes e ao Professor Doutor José Augusto Alves Teixeira, pelos conselhos e enriquecedoras conversas no Laboratório de Geografia Física que foram fundamentais para ampliar a minha visão e conhecimento. Sou também grato pelos contributos que deram ao meu crescimento académico ao longo deste percurso.

Agradeço também ao pessoal do Laboratório de Geografia Física, à Sara, ao Jorge, ao Edgar e ao Rui pelo ambiente acolhedor, pela boa disposição e por toda a ajuda e disponibilidade ao longo deste percurso. A vossa presença tornou os momentos

passados no laboratório mais leves, mais divertidos, produtivos e significativos, contribuindo de forma importante para a realização deste trabalho.

Agradeço ao Professor Doutor Paulo Fernandes, pela disponibilidade, em especial pela partilha de dados dos modelos de combustível e conhecimentos que foram úteis para o desenvolvimento desta dissertação.

Com o coração cheio de gratidão, agradeço aos meus pais, que sempre foram um porto seguro. Obrigado por me darem a oportunidade de seguir este caminho, por cada gesto de carinho, por cada palavra de encorajamento e por nunca deixarem de acreditar em mim. A vossa presença constante, o vosso amor incondicional e a vossa fé silenciosa foram a base sobre a qual construí este percurso. Sem vocês, nada disto teria sido possível.

A toda a minha família, o meu mais sincero obrigado. O vosso apoio, mesmo à distância, foi um abraço constante nos momentos em que mais precisei. Cada palavra vossa, cada gesto de compreensão, ajudou-me a seguir em frente com mais força e confiança.

Aos meus grandes amigos Ricardo e João, companheiros de jornada, deixo um agradecimento profundo. Pela ajuda constante, pelas palavras de apoio nos momentos difíceis, pelos muitos momentos que vivemos e partilhámos na Invicta, e por nunca deixarem de estar presentes quando precisei. Ricardo, nunca esquecerei as noites de trabalho lado a lado, em que tu sempre me mantiveste acordado, atento e animado. João, as noites de conversa sempre interessantes e inspiradoras que tanto ajudaram a aliviar a pressão e a esquecer outros problemas, mantendo motivação. A vossa amizade foi, e sempre será, um dos pilares desta caminhada e da minha vida.

Ao Nelo e ao Malheiro, obrigado por estarem sempre por perto, com a vossa presença tranquila e constante. A vossa amizade foi uma presença permanente ao longo deste percurso.

Ao Ruben o nosso “Shika”, obrigado por seres essa presença atenta e cuidadora. Irei levar sempre esta amizade que o Porto me deu no coração, bem como todos os momentos que vivemos eu guardo na memória com alegria. Nunca esquecerei as vezes em que me tiraste do quarto e me lembraste de parar e me convidaste para ir jogar às

cartas ou ir dar uma volta. A tua amizade foi essencial para manter o equilíbrio e a sanidade ao longo deste percurso.

À querida Gabriela, a minha “Madrinha”, um obrigado muito especial. A tua ajuda, o teu apoio e até os teus puxões de orelhas foram sempre dados com o coração. Obrigado por te importares, por cuidares de mim, te preocupares e por estares presente e por nunca desistires de mim.

À Catarina e à Juliana, companheiras destes anos no Porto, o meu sincero agradecimento. Tornaram esta etapa mais leve, mais bonita e mais cheia de significado. A vossa amizade foi um presente precioso que levo no coração.

Quero agradecer, do fundo do coração, àqueles que, mesmo estando longe, continuam sempre por perto aos meus “amigos da terrinha”. A vida levou-nos por caminhos diferentes, mas a ligação que nos une resiste ao tempo e à distância. É reconfortante saber que, apesar de tudo, continuamos presentes na vida uns dos outros.

Deixo um agradecimento muito especial à Mariana, à Catarina e à Andreia. Vocês sempre foram aquelas amigas que, mesmo à distância, nunca deixaram de se preocupar, de estar presentes, de puxar pelo grupo. Com planos para jantares, idas à praia ou aquelas festas tão nossas, da terrinha, fizeram sempre questão de manter viva a nossa amizade. Obrigado, de coração, pela vossa amizade, pelo vosso carinho e por nunca deixarem que a distância se transformasse em afastamento. É por amigas como vocês que tudo vale a pena.

Quero também agradecer às duas “únicas pessoas iguais que conheço” as gémeas Vanessa e Mariana. A nossa amizade tem resistido ao tempo e à distância, mesmo quando a vida nos afastou ou quando perdemos o contacto durante algum tempo. Ainda assim, sempre que foi preciso, estiveram lá. Obrigado por nunca hesitarem em ajudar-me, por corrigirem os meus trabalhos, por darem sugestões e conselhos com tanto carinho e paciência. A vossa amizade é daquelas raras e genuínas que guardo com muito apreço no coração.

Por fim, deixo um agradecimento especial a todos os meus amigos e colegas que, ao longo deste percurso, estiveram ao meu lado, direta ou indiretamente. Cada palavra de

incentivo, cada gesto de apoio e cada momento partilhado contribuíram para tornar esta caminhada mais leve e significativa. A vossa amizade, companheirismo e presença foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui. Obrigado por tudo.

Resumo

Portugal é um dos países europeus mais afetados por incêndios rurais, sendo o Alto Minho uma das sub-regiões com maior incidência. Esta dissertação visa modelar a severidade potencial do fogo nesta região, recorrendo a Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e ao simulador FlamMap. A metodologia envolveu a recolha e processamento de dados topográficos, climáticos, de ocupação do solo, cobertura de copas e modelos de combustível, integrados em ambiente SIG.

Neste trabalho foram simulados cenários de comportamento básico do fogo para a paisagem atual e para paisagens alternativas de gestão territorial. Os modelos de severidade foram criados utilizando a intensidade da linha de fogo e o comprimento das chamas. Os resultados indicam que a topografia, o tipo de combustível e a densidade da cobertura de copas influenciam significativamente a distribuição espacial da severidade potencial. Áreas com declives acentuados, elevada carga de combustível e copas densas apresentam maior severidade a incêndios rurais no Alto Minho.

A análise comparativa dos cenários revela que intervenções no uso do solo e estratégias de gestão integrada, podem reduzir substancialmente a severidade potencial do fogo. Conclui-se que a modelação da severidade associada a modelos de comportamento do fogo constitui uma ferramenta eficaz de apoio à decisão no ordenamento florestal, permitindo identificar áreas prioritárias para intervenção, reforçando a necessidade de políticas de gestão baseadas em evidências espaciais, com vista ao aumento da resiliência da paisagem face aos incêndios rurais.

Palavras-chave: Severidade do fogo, Incêndios rurais, Alto Minho, Sistemas de Informação Geográfica, Modelação espacial.

Abstract

Portugal is one of the European countries most affected by rural fires, with Alto Minho being one of the sub-regions with the highest incidence. This dissertation aims to model the potential severity of fire in this region, using Geographic Information Systems (GIS) and the FlamMap simulator. The methodology involved the collection and processing of topographic, climatic, land use, canopy cover, and fuel models data, integrated into a GIS environment.

In this work, basic fire behaviour scenarios were simulated for the current landscape and for alternative land management landscapes. Severity models were created using fire line intensity and flame length. The results indicate that topography, fuel types, and canopy cover density significantly influence the spatial distribution of potential severity. Areas with steep slopes, high fuel load, and dense canopy cover are more prone to rural fires in Alto Minho.

A comparative analysis of the scenarios reveals that land use interventions and integrated management strategies can substantially reduce the potential severity of fire. It is concluded that modelling severity associated with fire behaviour models is an effective decision support tool in forest management, allowing the identification of priority areas for intervention and reinforcing the need for management policies based on spatial evidence, with a view to increasing the resilience of the landscape to rural fires.

Keywords: Fire severity, Rural fires, Alto Minho, Geographic Information Systems, Spatial modelling.

Índice de Figuras

FIGURA 1. NÚMERO DE OCORRÊNCIAS DE INCÊNDIOS RURAIS E ÁREA ARDIDA ENTRE 2003 E 2023 NO ALTO MINHO.....	15
FIGURA 2. NÚMERO DE OCORRÊNCIAS E ÁREA ARDIDA (HA), ENTRE 2003 E 2023, NO ALTO MINHO E EM PORTUGAL CONTINENTAL.....	22
FIGURA 3. TRIÂNGULO DO FOGO E SUAS COMPONENTES (COUNTRYMAN, 1972).....	23
FIGURA 4. LOCALIZAÇÃO DO ALTO MINHO E DOS MUNICÍPIOS INTEGRANTES.....	37
FIGURA 5. UNIDADES DE PAISAGEM DO ALTO MINHO.....	38
FIGURA 6. CLASSES HIPSOMÉTRICAS (EM METROS) DO ALTO MINHO.....	40
FIGURA 7. DECLIVES (GRAUS) ALTO MINHO.....	41
FIGURA 8. EXPOSIÇÃO DE VERTENTES, NO ALTO MINHO.....	42
FIGURA 9. TIPOS DE TERMOCLIMAS.....	45
FIGURA 10. TIPOS DE PLUVIOCLIMA.....	45
FIGURA 11. CARTA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO 2018 (NÍVEL 1).....	46
FIGURA 12. CLASSES DA CARTA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO INCINERÁVEIS (NÍVEL 4).....	48
FIGURA 13. PERCENTAGEM DE ÁREA OCUPADA POR CLASSE DA CARTA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO 2018 INCINERÁVEIS (NÍVEL 4).....	48
FIGURA 14. PERCENTAGEM DE COBERTURA DE COPAS NO ALTO MINHO.....	50
FIGURA 15. DISTRIBUIÇÃO DOS MODELOS DE COMBUSTÍVEL, NO ALTO MINHO.....	52
FIGURA 16. PERCENTAGEM DE ÁREA OCUPADA POR MODELO DE COMBUSTÍVEL.....	52
FIGURA 17. CLASSIFICAÇÃO DOS REGIMES DE FOGO PARA PORTUGAL.....	54
FIGURA 18. EVOLUÇÃO DOS PONTOS DE IGNIÇÃO NO ALTO MINHO (2003 A 2023).....	55
FIGURA 19. NÚMERO DE PONTOS DE IGNIÇÃO POR MUNICÍPIO.....	56
FIGURA 20. EVOLUÇÃO ANUAL DO NÚMERO DE PONTOS DE IGNIÇÃO NOS MUNICÍPIOS DO ALTO MINHO (2003 A 2023).....	57
FIGURA 21. DENSIDADE DOS PONTOS DE IGNIÇÃO PARA OS 20 ANOS (2003 A 2023).....	58
FIGURA 22. NÚMERO DE PONTOS DE IGNIÇÃO POR MÊS.....	59
FIGURA 23. PROBABILIDADE ANUAL DE OCORRÊNCIA DE INCÊNDIOS RURAIS NO ALTO MINHO.....	60
FIGURA 24. GRÁFICO DE DISPERSÃO DA DENSIDADE POPULACIONAL E DOS PONTOS DE IGNIÇÃO.....	61
FIGURA 25. POPULAÇÃO POR GRUPO ETÁRIO POR CONCELHO.....	63
FIGURA 26. POPULAÇÃO EMPREGADA POR SETOR DE ATIVIDADE.....	63
FIGURA 27. ESQUEMA METODOLÓGICO ADOTADO	64

FIGURA 28. CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS DE COMBUSTÍVEL FLORESTAL PARA PORTUGAL RETIRADO DE FERNANDES AND LOUREIRO (2022).....	69
FIGURA 29. CARACTERÍSTICAS DOS MODELOS DE COMBUSTÍVEL FLORESTAL PARA A REGIÃO CENTRO DE PORTUGAL, RETIRADO DE CRUZ (2005).....	69
FIGURA 30. MODELO DE COMBUSTÍVEL CUSTOMIZADO.....	70
FIGURA 31. MODELO DE HUMIDADE DOS COMBUSTÍVEIS CUSTOMIZADO.	71
FIGURA 32. VISTA DA CAMADA DOS MODELOS DE COMBUSTÍVEL NO LAYOUT DO FLAMMAP.	72
FIGURA 33. SELEÇÃO DE DADOS DE ENTRADA E OUTPUTS NO FLAMMAP.....	75
FIGURA 34. CLASSES DAS DA INTENSIDADE DO FOGO E DO COMPRIMENTO DA CHAMA RETIRADO DE (FERNANDES & PALHEIRO, 2015).....	76
FIGURA 35. MATRIZ DE SEVERIDADE POTENCIAL DO FOGO.....	77
FIGURA 36. MODELO DE SEVERIDADE POTENCIAL DO FOGO PARA A PAISAGEM 1.	80
FIGURA 37. PERCENTAGEM DO TERRITÓRIO OCUPADO POR CADA CLASSE DE SEVERIDADE DA PAISAGEM 1.....	80
FIGURA 38. MODELO DE SEVERIDADE POTENCIAL DO FOGO PARA A PAISAGEM 2.....	83
FIGURA 39. PERCENTAGEM DO TERRITÓRIO OCUPADO POR CADA CLASSE DE SEVERIDADE DA PAISAGEM 2.....	83
FIGURA 40. MODELO DE SEVERIDADE POTENCIAL DO FOGO PARA A PAISAGEM 3.....	85
FIGURA 41. PERCENTAGEM DO TERRITÓRIO OCUPADO POR CADA CLASSE DE SEVERIDADE DA PAISAGEM 3.....	86
FIGURA 42. FREGUESIAS DO ALTO MINHO.....	99

Índice de Tabelas

TABELA 1. CARACTERÍSTICAS DOS DADOS DE BASE	65
TABELA 2. TEMAS UTILIZADOS NA CRIAÇÃO DA <i>LANDSCAPE</i>	66
TABELA 3. DADOS PARA A CONSTRUÇÃO DO MODELO DE COMBUSTÍVEL CUSTOMIZADO.....	68
TABELA 4. DADOS PARA A CONSTRUÇÃO DO FICHEIRO DE HUMIDADE INICIAL DO COMBUSTÍVEL ADAPTADO DE FINNEY (2023).	70
TABELA 5. FREGUESIAS DO ALTO MINHO.....	99

1. Introdução

1.1. Contexto e motivação

Portugal é um dos países do sul da Europa mais fustigados pelos incêndios rurais (Bergonse *et al.*, 2022), sobretudo durante a estação seca, que provocam graves consequências ao nível social, económico e ambiental. Os incêndios rurais têm assolado todo o território nacional, sendo responsáveis por elevados prejuízos humanos e de bens materiais. Segundo o relatório de atividades do Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais de 2023, foram registados em 2023 7 523 incêndios rurais, resultando numa área ardida de 34 509 ha (AGIF, 2023). Em 2023, a maior parte da área ardida em Portugal correspondeu a povoamentos florestais (56%), seguida por matos (38%) e os restantes 6% correspondem às áreas agrícolas (AGIF, 2023). Comparando a média anual do período compreendido entre 2001 e 2017 (161 437 ha) com a média do período de 2018 a 2023 (54 439 ha), observa-se uma diminuição de 66% das áreas ardidas (AGIF, 2023).

Segundo o Inventário Nacional Florestal (ICNF, 2019), as florestas, os matos e os terrenos improdutivos ocupam 6,2 milhões de hectares (69,4%) do território nacional continental. A floresta, que inclui terrenos arborizados e temporariamente desarborizados (superfícies cortadas, ardidas e em regeneração), constitui o principal uso do solo nacional (36%) (ICNF, 2019). Apesar da diminuição de área florestal, que se registava desde 1995, esta inverteu-se em 2015, registando-se um aumento de 60 mil ha (1,9%) face a 2010, data da última avaliação (ICNF, 2019).

Face à destruição provocada pelos incêndios rurais, é necessário adotar uma gestão mais eficiente do ordenamento do território, dos recursos de combate ao fogo e do combustível, com o objetivo de implementar políticas de exclusão do fogo, redução dos pontos de ignição e que promovam uma gestão adequada da ocupação do solo. Neste contexto, a avaliação do risco de incêndio rural e as medidas de gestão do combustível assumem um papel essencial na diminuição dos impactos causados pelos incêndios rurais (Ager *et al.*, 2011).

É essencial avaliar a severidade dos incêndios rurais, uma vez que esta apresenta uma relação direta com a intensidade do fogo (Keeley, 2009). A severidade surgiu da necessidade de descrever como a intensidade dos incêndios afeta os ecossistemas após a sua ocorrência (Bento-Gonçalves *et al.*, 2019). Segundo Julião *et al.* (2009, p. 20), a severidade é definida como a "capacidade do processo ou ação para causar danos em função da sua magnitude, intensidade, grau, velocidade ou outro parâmetro que melhor expresse o seu potencial destruidor."

O objetivo principal deste estudo passa por modelar e caracterizar a distribuição espacial da severidade dos incêndios rurais na sub-região do Alto Minho, no sentido de compreender a capacidade dos incêndios rurais para causarem dano. A área de estudo corresponde à sub-região do Alto Minho, uma vez que esta é uma das regiões da Europa onde a recorrência do fogo é maior (de Oliveira & Fernandes, 2023).

De acordo com o Relatório de Atividades do Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais de 2023, a Região Norte regista, à escala nacional, o maior número de ocorrências de incêndios rurais. Entre 2018 e 2023, foram registadas 58 992 ocorrências de incêndios rurais em Portugal continental, das quais 54% ocorreram na Região Norte. Entre os 10 concelhos com mais ocorrências entre 2018 e 2023, Arcos de Valdevez ocupa o 7º lugar com 877 ocorrências registadas (AGIF, 2023).

Conforme os dados oficiais do Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), a sub-região do Alto Minho registou entre 2003 e 2023 uma área ardida de 164 682,6 ha resultante de 26 405 ocorrências de incêndios, sendo estas sobretudo fogos rurais. Os anos mais críticos em termos de área ardida foram 2005, 2016 e 2010. Em 2005, arderam 27 740,1 ha, em 2016, arderam 26 838,8 ha e em 2010, arderam 24 592,6 ha (Figura 1). No que diz respeito ao número de ocorrências, estas têm vindo a diminuir ao longo dos 20 anos (Figura 1). Destacam-se os anos de 2005 com 2 597 ocorrências, 2011 com 2 428 ocorrências e 2010 com 2 269 ocorrências, com os maiores números de ocorrências.

Na sub-região do Alto Minho as florestas ocupam 71,85 mil ha (32% da área), os matos e as pastagens ocupam 72,83 mil ha (33% da área) e os improdutivos ocupam 15,18 mil

ha (7% da área) (ICNF, 2019). A espécie que predomina na sub-região é o eucalipto com 25,45 mil ha (35,4 % da floresta) e depois é o pinheiro-bravo que ocupa 24,28 mil ha (34% da floresta). Os carvalhos ocupam 8,16 mil ha, o que corresponde a 11% da floresta e as outras folhosas que ocupam 11,73 mil ha (16% da floresta). A espécie menos representada é o pinheiro-manso, com 0,05 mil ha, cerca de 0,1% da floresta (ICNF, 2019).

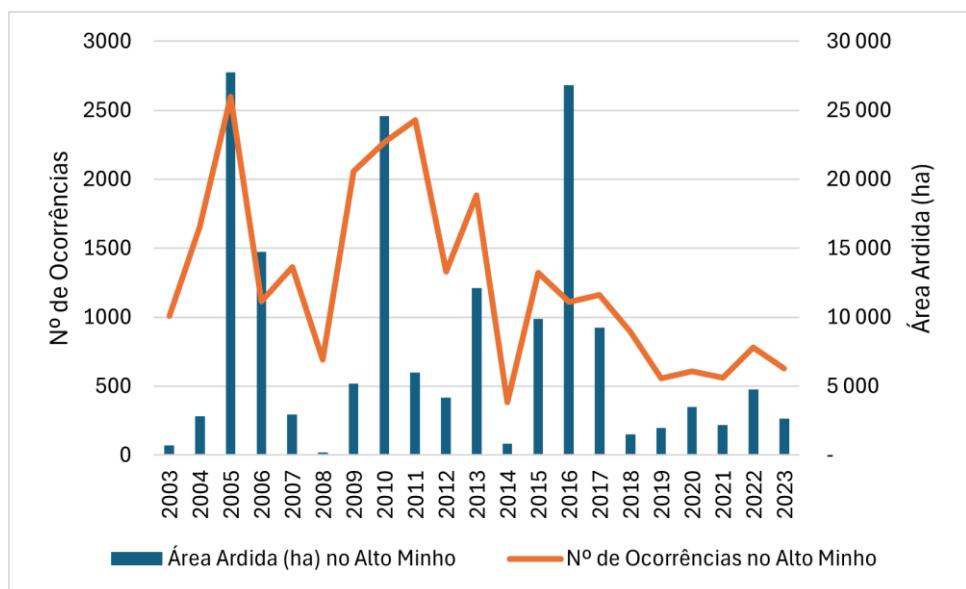


Figura 1. Número de ocorrências de incêndios rurais e área Ardida entre 2003 e 2023 no Alto Minho.

Fonte: Registos individuais de incêndios rurais de 2001 a 2023, Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (<https://sig.icnf.pt/portal/home/item.html?id=36f9c2fbb424f9882cbd0c912677b4&fromSearch=true&searchPosition=12&searchTerm=&searchFacet=card+dropdown+item+details>).

1.2. Questões de partida

Tendo em conta o contexto acima descrito, colocam-se as seguintes questões de partida, às quais se procura responder ao longo deste trabalho:

- Quais são os padrões espaciais que caracterizam a severidade dos incêndios rurais no Alto Minho?
- Quais são os fatores de controlo por eles responsáveis?

- Quais são as mudanças no uso do solo necessárias para gerar uma paisagem onde os incêndios rurais apresentem uma menor severidade no Alto Minho?

1.3. Objetivo

Com base nestas questões de partida, definiu-se como objetivo principal deste trabalho a modelação da severidade potencial dos incêndios rurais do Alto Minho.

1.4. Objetivos específicos

Com base no objetivo principal definiram-se os seguintes objetivos específicos deste estudo:

1. Caracterizar o histórico de incêndios rurais no Alto Minho;
2. Analisar os fatores que condicionam a severidade de incêndios rurais (declives, altimetria, exposição de vertentes, percentagem de cobertura de copas e modelos de combustível);
3. Simular as paisagens do Alto Minho usando o software FlamMap, considerando três cenários (i) paisagem atual; (ii) mudanças do uso do solo em áreas de severidade extrema; (iii) mudanças do uso do solo em áreas de severidade elevada;
4. Modelar a severidade (intensidade da linha de fogo e comprimento das chamas) para os incêndios rurais, tendo em conta a paisagem atual e os cenários de paisagem futura;
5. Propor medidas de gestão e ordenamento florestal para a minimização da severidade dos incêndios rurais na área de estudo.

1.5. Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais

Com o objetivo de garantir uma articulação eficaz entre todas as entidades envolvidas na prevenção estrutural, proteção de pessoas e infraestruturas, apoio à decisão, combate a incêndios rurais e recuperação das áreas afetadas, foi criado o Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais (SGIFR). Este sistema foi operacionalizado através do Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais (PNGIFR), aprovado pela Resolução do Conselho de Ministros n.º 45-A/2020 (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro).

O SGIFR introduz uma abordagem integrada à gestão dos territórios rurais, promovendo a mobilização dos setores agrícola e pecuário para uma atuação coordenada entre a prevenção e a supressão. Neste contexto, destacam-se boas práticas de ordenamento e gestão da paisagem, como a manutenção de faixas de gestão de combustível, a eliminação e valorização de sobrantes, a renovação de pastagens e a criação de mosaicos agrossilvopastoris, fundamentais para construir territórios mais resilientes, sustentáveis e geradores de valor económico e ecológico (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro).

Enquanto estrutura nacional, o SGIFR define macropolíticas e orientações estratégicas para reduzir o risco de incêndio e promover a mudança de comportamentos por parte dos utilizadores e beneficiários do território rural. Assenta num conjunto de normas, processos e estruturas que garantem a articulação institucional ao longo de todas as fases do ciclo do fogo: planeamento, prevenção, preparação, supressão, socorro e recuperação pós-evento (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro).

O sistema organiza-se em dois eixos fundamentais:

1. Proteção contra incêndios rurais, centrada na segurança de pessoas, animais e bens, promovendo medidas de autoproteção, reforço da resiliência das construções e redução da suscetibilidade ao risco;
2. Gestão do fogo rural, focada na valorização do território e na mitigação das condições que favorecem a ocorrência e propagação dos incêndios.

Com base no princípio da especialização do conhecimento, o SGIFR promove o uso de recursos humanos e técnicos qualificados, assegurando uma atuação eficiente e coordenada. As entidades responsáveis pela sua execução podem estabelecer contratos de colaboração ou delegar tarefas, garantindo uma resposta eficaz às diferentes fases da gestão do fogo, conforme o PNGIFR (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro).

Regendo-se por princípios como a transparência, eficácia, subsidiariedade, mobilização multissetorial, racionalidade na afetação de recursos e avaliação contínua, o SGIFR alinha-se com as boas práticas internacionais e com os princípios da FAO em matéria de gestão integrada do fogo (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro).

A estrutura do sistema envolve diversas entidades públicas e privadas, com destaque para a Agência para a Gestão Integrada de Fogos Rurais (AGIF), que assegura a coordenação estratégica, e organismos como o ICNF, ANEPC, GNR e os municípios, entre outros com competências na floresta, proteção civil, território e segurança (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro).

1.6. Redes de defesa

O planeamento territorial integrado contempla redes estruturais destinadas à proteção e gestão do fogo, compostas por faixas primárias, secundárias e terciárias de gestão de combustível, mosaicos estratégicos, rede viária florestal, pontos de água e sistemas de vigilância. A sua monitorização é da responsabilidade do ICNF, ANEPC, GNR e municípios, cabendo a estes últimos a recolha e atualização dos dados, de acordo com normas técnicas conjuntas (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro).

A gestão de combustíveis em zonas críticas é feita através da modificação da vegetação, com ações como desramação, desbaste, remoção de biomassa e instalação de ocupações compatíveis. Estas intervenções visam limitar a propagação do fogo, proteger infraestruturas e isolar potenciais focos de ignição. As normas técnicas são elaboradas pelo ICNF, com parecer da AGIF, ANEPC e GNR, e homologadas pelo Governo (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro).

Em áreas classificadas ou com espécies protegidas, as intervenções previstas nos programas sub-regionais podem ser realizadas sem necessidade de nova autorização, desde que orientadas para a redução da continuidade de combustível. Ações de arborização ou rearborização devem respeitar as áreas estratégicas previstas nesses programas (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro).

Em territórios de elevada perigosidade, podem ser constituídas áreas integradas de gestão da paisagem, nomeadamente onde haja histórico de incêndios, povoamentos envelhecidos sem intervenção ou zonas inseridas na rede primária. Nessas áreas, são aplicáveis restrições à deposição de materiais inflamáveis, sendo obrigatório manter uma faixa de 10 metros sem vegetação e gerir os 40 metros adjacentes. A deposição temporária de resíduos de biomassa é permitida por até 10 dias, mediante notificação à GNR (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro).

Compete a cada município registar as ações de gestão de combustível realizadas no seu território.

1.6.1. Rede Primária de Faixas de Gestão de Combustível

A Rede Primária de Faixas de Gestão de Combustível (RPGFC), instituída pelo Decreto-Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro, integra o Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais (SGIFR) e constitui uma das principais estratégias de prevenção estrutural de incêndios rurais em Portugal (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro).

Esta rede é composta por faixas de terreno estrategicamente localizadas, com o objetivo de compartimentar o território rural, limitando a propagação de grandes incêndios, facilitando as operações de combate, protegendo infraestruturas críticas e zonas sensíveis, e isolando potenciais focos de ignição (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro). As faixas da RPGFC possuem, geralmente, uma largura mínima de 126 metros e são projetadas para compartimentar áreas com dimensões preferenciais entre 500 e 10.000 hectares. Estas dimensões podem ser ajustadas com base em critérios técnicos, tais como a topografia, a vegetação, o histórico de incêndios e o valor ecológico ou socioeconómico das áreas em causa (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro).

A constituição e a localização da RPFGC são definidas nos Programas Regionais e Sub-regionais de Ação, elaborados em conformidade com o Plano Nacional de Gestão Integrada de Fogos Rurais (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro). A coordenação destas atividades é da responsabilidade do Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), que assegura a execução e monitorização das faixas (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro). Esta responsabilidade pode ser partilhada com outras entidades da Administração Pública, municípios ou organizações do setor florestal, mediante convenção (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro). A implementação da RPFGC pode envolver a imposição de servidões administrativas sobre propriedades privadas, com os proprietários sendo eventualmente indemnizados conforme a legislação vigente (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro). As intervenções nas faixas incluem a remoção parcial ou total da vegetação, a limpeza do estrato arbustivo, o desbaste de povoamentos florestais, a desramação das árvores nos primeiros metros de altura e a manutenção da vegetação num estado que não favoreça a propagação rápida do fogo (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro). A escolha das técnicas e a intensidade das intervenções são definidas com base em critérios técnicos de eficácia, segurança e sustentabilidade, respeitando os valores ambientais, paisagísticos e culturais do território (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro). A manutenção destas faixas deve ser regular e contínua, integrando-se numa estratégia de longo prazo que promova a resiliência dos territórios rurais aos incêndios (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro).

Em suma, a Rede Primária de Faixas de Gestão de Combustível é uma infraestrutura fundamental para a defesa da floresta contra incêndios, concebida para reduzir o risco e os impactos dos fogos rurais em larga escala (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro). Planeada a nível nacional e executada com base em critérios técnicos rigorosos, a RPGFC contribui significativamente para a segurança das populações, a proteção do património natural e a eficácia dos meios de combate, integrando-se numa abordagem abrangente e integrada de gestão do fogo em Portugal (Dec. Lei n.º 82/2021, de 13 de outubro).

2. A avaliação da severidade dos incêndios rurais

2.1. Incêndios rurais

Entende-se por incêndio rural um fogo incontrolado que ocorre em florestas, matas e outros espaços com vegetação abundante, como matos, áreas de incultos e áreas agrícolas (Castro *et al.*, 2003). De acordo com o Decreto-Lei n.º 82/2021, um incêndio rural corresponde à ignição ou propagação do fogo em espaço rural, de forma não planeada ou fora de controlo, exigindo, por isso, a adoção de medidas de supressão. Estes incêndios são comuns em regiões de clima mediterrânico, especialmente em dias quentes e secos, sendo frequentemente exacerbados por ventos fortes (Julião *et al.*, 2009). O fogo apresenta-se como um importante fator nas dinâmicas de vários ecossistemas terrestres (Ventura & Vasconcelos, 2006). O fogo não deve, nem pode, ser completamente eliminado, uma vez que constitui um fenómeno natural intrínseco aos ecossistemas. Desempenha um papel essencial na dinâmica evolutiva de determinadas espécies e na regeneração da paisagem, funcionando como um agente modelador dos sistemas florestais. A sua presença precede a intervenção humana e as tentativas de controlo associadas à ocupação e gestão do território (Verde, 2008).

Embora possam ser causados por fenómenos naturais, como trovoadas secas, a maioria dos incêndios florestais resulta de negligência humana e, muitas vezes, de atos criminosos (Julião *et al.*, 2009).

Portugal é um dos países europeus mais afetados pelos incêndios rurais (Parente & Pereira, 2016). No período de 20 anos (2003 até 2023), segundo os dados disponibilizados pelo Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF), em Portugal Continental arderam cerca de 2 709 158 hectares de espaços florestais. Os anos mais críticos em termos de área ardida foram 2003, 2005 e 2017. Em 2003 arderam 439 908,8 ha, em 2005 arderam 346 362,7 ha e em 2017 arderam 561 009,8 ha (Figura 2).

No que diz respeito ao número de ocorrências, este tem vindo a diminuir ao longo das últimas duas décadas (Figura 2). Destacam-se os anos de 2005 com 41 689 ocorrências, de 2009 com 29 783 ocorrências e de 2011 com 29 782 ocorrências.

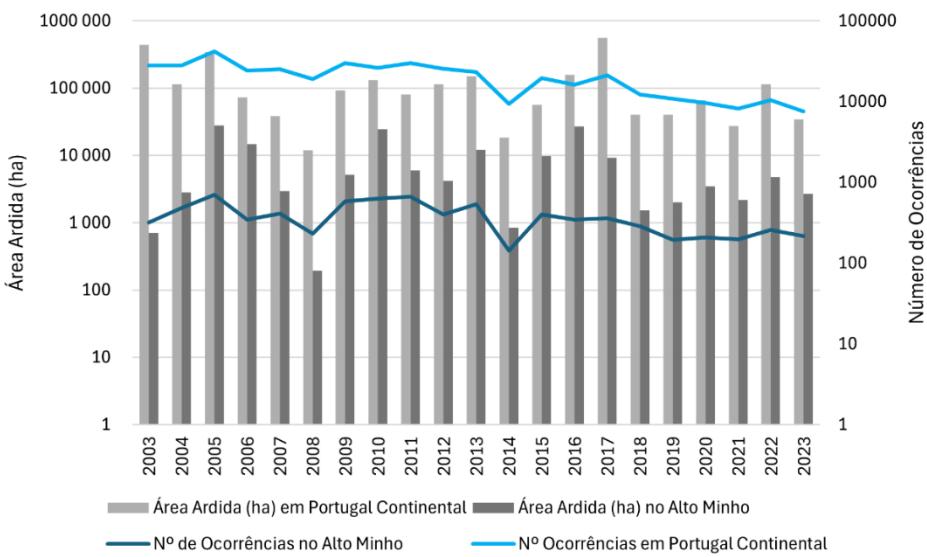


Figura 2. Número de ocorrências e área ardida (ha), entre 2003 e 2023, no Alto Minho e em Portugal Continental.

Fonte: Registos individuais de incêndios 2001 a 2023, Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (<https://sig.icnf.pt/portal/home/item.html?id=36f9c2fb8b424f9882cbd0c9126777b4&fromSearch=true&searchPosition=12&searchTerm=&searchFacet=card+dropdown+item+details>).

2.2. Fatores que influenciam o comportamento do fogo

Para que um incêndio se inicie e se propague, é necessário haver material combustível, condições meteorológicas adequadas e fontes de ignição (Ventura & Vasconcelos, 2006). A vegetação e as condições meteorológicas (temperatura, humidade relativa do ar, direção e velocidade do vento) são influenciadas pelas características edafoclimáticas e topográficas de cada região (Ventura & Vasconcelos, 2006). O papel da vegetação, bem como dos combustíveis em geral, pode ser considerado de acordo com vários parâmetros, como a carga, tamanho, continuidade, quantidade dos combustíveis finos e mortos e, por fim, a humidade (Esteves, 2020). Outro fator importante são as características do relevo, como a altitude, o declive e a exposição das vertentes (Esteves, 2020).

Uma grande parte das ignições resulta da atividade humana (Ventura & Vasconcelos, 2006). Assim sendo, é imprescindível analisar as fontes de ignição, os fatores condicionantes que contribuem para a sua propagação e avaliar o comportamento do fogo. Neste contexto, é necessária uma avaliação da perigosidade e da suscetibilidade

das áreas em estudo, tornando-se imperativa a construção de cartografia de risco de incêndio florestal para a identificação das áreas mais suscetíveis a este fenômeno (Amador, 2014).

Os incêndios rurais constituem um fenômeno recorrente que tem despertado crescente interesse entre investigadores e gestores do território. Nas últimas décadas, este interesse resultou em diversas investigações destinadas ao desenvolvimento de modelos matemáticos para descrever o comportamento do fogo, bem como à sua integração em sistemas informáticos de simulação e modelação (Paixão, 2014).

O comportamento do fogo está intrinsecamente relacionado com o ambiente em que ocorre, resultando da interação de três componentes principais: topografia, vegetação e condições meteorológicas (Figura 3). Esta interação é conhecida como o triângulo do fogo (Paixão, 2014). Cada um destes fatores exerce efeitos específicos sobre o comportamento do fogo. A avaliação correta destes fatores antes de um incêndio permite prever ou simular as características do fogo (Mérida, 2010).

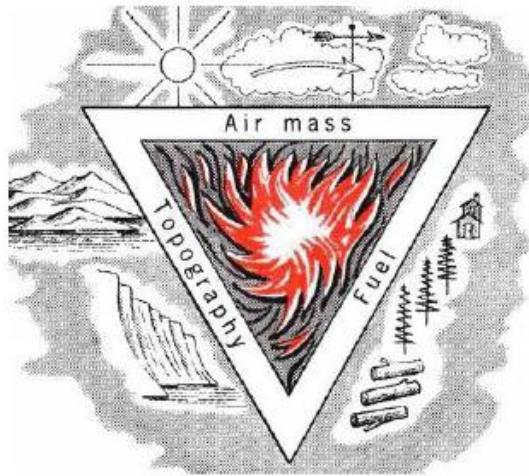


Figura 3. Triângulo do fogo e suas componentes (Countryman, 1972).

2.2.1. Topografia

Uma das componentes que mais influencia o comportamento do fogo é a topografia, que inclui elementos como a altitude, os declives e a orientação das encostas. Embora estes elementos possam variar espacialmente, mantêm as suas características ao longo

do tempo (Pyne *et al.*, 1996). Além de influenciar diretamente o comportamento do fogo, a topografia também afeta a vegetação e as condições meteorológicas (Pyne *et al.*, 1996). O efeito da topografia sobre o fogo é mais acentuado em áreas com terreno abrupto, enquanto em zonas planas a sua influência é mínima (Mérida, 2010).

A altitude afeta o comportamento de forma indireta. Além de ser um fator limitante no que diz respeito à temperatura do ar, à precipitação e aos níveis de oxigénio, que são um fator necessário à ignição, condiciona em simultâneo a composição e a estrutura da vegetação. A altitude também influencia a humidade relativa e a velocidade do vento.

A exposição das vertentes afeta indiretamente o comportamento do fogo, sendo determinante devido à quantidade de energia solar incidente. Além disso, a exposição pode influenciar os ventos dominantes (Mérida, 2010). No hemisfério norte, as encostas orientadas a norte recebem menos energia solar, sendo mais frescas do que as encostas orientadas a sul (Pyne *et al.*, 1996). No entanto, as encostas a norte têm maior disponibilidade hídrica, o que gera um aumento na carga de combustível (Paixão, 2014).

A declive influencia diretamente o comportamento do fogo, afetando a direção de avanço da frente do incêndio e a sua velocidade. Além disso, o declive determina a altura de dessecamento das copas e a possibilidade de o fogo atingir as copas das árvores (Mérida, 2010). Locais mais declivosos proporcionam mais calor transmitido e maior contacto da chama com o combustível envolvente do que terrenos mais planos para incêndios com propagação em sentido ascendente (Butler *et al.*, 2007; Rothermel, 1972). Juntamente com a orientação da encosta, o declive também influencia a quantidade de radiação solar recebida, desempenhando um papel importante no fenómeno atmosférico da ascensão do ar, que ocorre durante o dia à medida que a temperatura aumenta (Paixão, 2014).

2.2.2. Meteorologia

A meteorologia é o fator mais variável do triângulo do fogo, podendo variar tanto no tempo como no espaço. A sua importância é tão significativa que pode sobrepor-se aos outros fatores e, por si só, condicionar o comportamento do fogo (Pyne *et al.*, 1996).

As condições meteorológicas podem influenciar o fogo de duas maneiras: na ignição e na propagação do fogo (Muñoz, 2000).

A propagação do fogo está fortemente condicionada pelos movimentos das massas de ar, pela intensidade e direção do vento, bem como pela estabilidade da atmosfera (Countryman, 1972). Segundo Countryman (1972) o vento é o elemento meteorológico mais importante e a variável que mais afeta o comportamento do fogo podendo apresentar variações de intensidade e direção difíceis de prever. A interação entre o vento e o declive pode acelerar a evapotranspiração da vegetação, facilitando a transferência de calor e o contato das chamas com os combustíveis circundantes (Rothermel, 1972).

As ignições são diretamente influenciadas pelas condições de humidade dos combustíveis, determinadas por fatores como a radiação solar, a precipitação, a temperatura do ar e a humidade relativa. A probabilidade de ignição aumenta à medida que o teor de humidade no ambiente suscetível ao fogo diminui (Paixão, 2014).

Segundo Pyne *et al.* (1996) a quantidade de combustível disponível para o processo de combustão está relacionada com o teor de água presente na vegetação (humidade do combustível).

2.2.3. Vegetação

A vegetação, ou seja, o combustível, é a última componente do fogo. A vegetação de um território atua como um meio de propagação do fogo. A análise detalhada dessa vegetação permite compreender e prever o comportamento do incêndio (Pyne *et al.*, 1996). É também a única variável que pode ser controlada através de medidas de gestão e planeamento (Paixão, 2014).

O comportamento do fogo pode ser influenciado por diversas características físicas e químicas dos combustíveis vegetais. Entre essas características, destacam-se o poder calorífico, que se define pela energia libertada pela quantidade de combustível; a carga de combustível, expressa pelo peso dos combustíveis por unidade de área; a relação superfície-volume, determinada pelas dimensões das partículas do combustível; e, por fim, o teor de humidade do combustível (Paixão, 2014).

O teor de humidade pode apresentar grandes variações no tempo e no espaço, assumindo uma importância significativa no comportamento do fogo. No entanto, essa influência diminui à medida que a fonte de calor aumenta, ou seja, conforme a frente de fogo evolui. Para que a ignição seja efetiva, é necessária a incidência de calor sobre o combustível, provocando a evaporação da água presente nele. O teor de humidade do combustível é expresso em percentagem e calculado pela seguinte fórmula (Paixão, 2014):

$$\text{(Peso Inicial–Peso Seco) / Peso Seco.}$$

Outro fator utilizado na caracterização dos combustíveis é o teor de humidade de extinção, definido como o valor de teor de humidade a partir do qual o fogo não se propaga.

A vegetação é geralmente classificada em camadas que correspondem a diferentes níveis em relação ao solo (Pyne *et al.*, 1996). Dessa forma, podem ser identificados três tipos distintos de combustíveis: os subterrâneos, os de superfície e os de copa (Paixão, 2014). Os combustíveis subterrâneos incluem a camada de matéria orgânica em decomposição no solo, como o húmus e raízes (Paixão, 2014). A maioria dos incêndios florestais propaga-se através do estrato arbustivo, também conhecido como combustíveis de superfície, sendo este considerado o mais relevante para o comportamento do fogo (Pyne *et al.*, 1996). Este estrato inclui árvores e arbustos com até 2-3 metros de altura, vegetação herbácea e resíduos lenhosos. Por fim, as árvores e arbustos com mais de 2-3 metros de altura são classificados como combustíveis de copa (Pyne *et al.*, 1996).

De acordo com Lopes (2013), o combustível florestal consiste no material orgânico, vivo ou morto, que pode ser consumido num incêndio. É um dos principais fatores do ambiente do fogo, sendo o único que pode sofrer modificação por parte do ser humano. Pode classificar-se em combustíveis vivos e mortos (Lopes, 2013). Esta diferenciação é crucial, pois os combustíveis florestais mortos, especialmente os finos, são responsáveis por alimentar os incêndios florestais. Estes combustíveis determinam, em larga escala, a velocidade e a intensidade da propagação do fogo (Lopes, 2013).

Os combustíveis florestais vivos também desempenham um papel significativo na ignição e propagação dos incêndios. Estes podem-se categorizar entre combustível vivo herbáceo ou lenhoso (Paixão, 2014) e influenciam a dificuldade de supressão devido ao teor de humidade e à inflamabilidade dos compostos químicos presentes (Lopes, 2013).

Para caracterizar e modelar o comportamento do fogo na superfície, é essencial, primeiramente, analisar e modelar a vegetação presente na área de estudo. Esta etapa é fundamental em qualquer tipo de análise ou previsão do comportamento do fogo, pois a vegetação existente será o combustível disponível em caso de incêndio (Mérida, 2010). A vegetação é um fator crucial para o controle dos incêndios florestais. A gestão dos combustíveis é essencial para a gestão e extinção do fogo (Mérida, 2010).

Os combustíveis florestais são constituídos por matéria vegetal que pode arder, permitindo a propagação do fogo na floresta. Especificamente, incluem árvores, arbustos, matos e vegetação herbácea, tanto vivos quanto mortos, além de fragmentos desses elementos em diferentes estados de decomposição (Ruiz González, 2004). Devido a esta heterogeneidade da vegetação, a sua classificação é difícil, sendo o combustível vegetal uma das variáveis mais estudadas na avaliação do comportamento do fogo (Paixão, 2014). De modo a simplificar a descrição das características dos combustíveis, a vegetação foi agrupada em tipos ou modelos de combustível que compartilham características semelhantes no que diz respeito ao comportamento do fogo (Mérida, 2010).

2.3. Severidade

O conceito de severidade do fogo surgiu da necessidade de caracterizar de forma mais precisa os efeitos da intensidade dos incêndios rurais sobre os ecossistemas (Keeley, 2009). Apesar do termo ter sido introduzido e utilizado ao longo de quase um século, não há consenso na comunidade científica quanto à sua definição nem aos métodos adequados para a sua quantificação (Han *et al.*, 2021). Diversas definições propostas para a severidade do fogo consistem em descrições genéricas dos impactos ecológicos dos incêndios, como por exemplo, o grau de perturbação ambiental induzido pelo fogo

(Keeley, 2009). A maioria dos estudos empíricos procura avaliar a severidade com base na perda ou transformação da matéria orgânica presente à superfície e no subsolo.

A severidade do fogo pode ser utilizada como um indicador abrangente dos impactos provocados pelos incêndios, englobando efeitos de natureza ecológica, geofísica, atmosférica e social (Hammill & Bradstock, 2006). De acordo com estes autores, a severidade é definida como o grau de dano físico observável na vegetação após a passagem do fogo, incluindo o consumo de material combustível morto e a queima de vegetação viva, resultantes do processo de combustão. Por sua vez, (Han *et al.*, 2021) propõem uma definição mais ampla, considerando a severidade como o grau de alteração ambiental induzida pelos incêndios rurais, ou ainda como o nível de perdas socioeconómicas associadas a esses eventos.

Neste estudo, adota-se a definição de severidade proposta por Julião *et al.* (2009), uma vez que esta é uma definição oficial, constando no Guia Metodológico Para a Produção de Cartografia Municipal de Risco e Para a Criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de Base Municipal (Julião *et al.*, 2009). De acordo com os autores, este conceito corresponde à capacidade de um processo ou fenómeno para causar danos, em função de parâmetros como a sua magnitude, intensidade, grau, velocidade, ou qualquer outro indicador que melhor expresse o seu potencial destrutivo.

2.4. Modelos do comportamento do fogo

A compreensão das características do território e da dinâmica de propagação do fogo constitui um elemento fundamental para o desenvolvimento de modelos que funcionem como instrumentos de apoio à decisão. Estes modelos são essenciais não apenas nas fases de prevenção e combate aos incêndios florestais, mas também na gestão sustentável e no ordenamento do território florestal.

Nas últimas décadas, têm sido desenvolvidos diversos modelos matemáticos com o intuito de simular o comportamento do fogo. Estes modelos baseiam-se em equações que descrevem a evolução espacial e temporal do incêndio, incluindo parâmetros como a velocidade de propagação e a intensidade da frente de fogo. A classificação destes

modelos pode ser feita com base na natureza dos processos analíticos subjacentes (teóricos, empíricos ou semi-empíricos), nos tipos de resultados que produzem (como a simulação da propagação do fogo ou a caracterização das propriedades da frente de fogo), ou ainda segundo o objetivo específico da modelação (por exemplo, regimes de fogo de superfície, de copa ou fenómenos de salto do fogo (Pastor *et al.*, 2003).

Os modelos de propagação de fogo de superfície constituem a categoria de modelos de comportamento do fogo mais amplamente investigada pela comunidade científica a nível global. Entre estes, destaca-se o modelo semi-empírico desenvolvido por Rothermel (1972), que se baseia no princípio do balanço global de energia. Este modelo tornou-se uma referência incontornável na área, sendo amplamente utilizado em contextos operacionais e de investigação devido à sua capacidade de estimar parâmetros fundamentais da propagação do fogo, como a velocidade de avanço da frente de chama e a intensidade do incêndio (Pastor *et al.*, 2003).

Para a aplicação do modelo é necessária a caracterização de um conjunto de parâmetros associados à vegetação (combustível), com o objetivo de determinar a taxa de propagação e a intensidade da frente de fogo (Rothermel, 1972). Este conjunto de dados permite a agregação de complexos de combustível em modelos de combustível, sendo os modelos desenvolvidos por Anderson (1982) os mais utilizados.

A modelação da propagação do fogo de copas é uma das mais complexas, devido ao reduzido número de estudos desenvolvidos nesta área (Paixão, 2014). Estes modelos podem ser classificados em duas categorias: modelos de iniciação de fogo de copa e modelos de propagação de fogo de copa (Pastor *et al.*, 2003). Entre os diversos modelos existentes, destaca-se o modelo semi-empírico de propagação de fogo desenvolvido por Van Wagner (1993), amplamente reconhecido e aceite. Para além destes, existem ainda modelos que descrevem o salto do fogo e o fogo subterrâneo; contudo, estes não foram considerados no âmbito do presente trabalho.

2.5. Simuladores do comportamento do fogo

Os modelos matemáticos que descrevem o comportamento do fogo têm sido progressivamente incorporados em aplicações informáticas, resultando no desenvolvimento de sistemas de cálculo e simulação da propagação de fogo (Albright & Meisner, 1999).

Uma parte dos sistemas de simulação do comportamento do fogo baseiam-se no modelo semi-empírico desenvolvido por Rothermel (1972), o qual foi implementado no software BEHAVE – *Fire Behaviour Prediction and Fuel Modeling System* (Andrews, 1986), concebido na década de 1980 pelo Serviço Florestal do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos. Desde então, têm sido desenvolvidos diversos sistemas adicionais. A evolução das tecnologias de informação geográfica, nomeadamente os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e dos softwares associados permitiu a integração de grandes volumes de dados espaciais nestes sistemas de simulação, possibilitando uma representação visual mais precisa e dinâmica da propagação do fogo na paisagem (Pastor *et al.*, 2003).

Para além dos modelos matemáticos de comportamento do fogo, os sistemas de simulação englobam também uma técnica de simulação que define a forma de propagação do fogo pela paisagem. Esta implementação pode ser efetuada através de processos matemáticos baseados em vetores pela aplicação do princípio de Huygens (Anderson, 1982) que considera a paisagem como um espaço contínuo, ou, numa abordagem matricial, como uma matriz constituída por células de iguais dimensões com características definidas (Lopes *et al.*, 2002). Na aproximação matricial a propagação do fogo de uma célula para as células vizinhas é regulada por uma série de regras específicas ou probabilidades de ocorrência (Paixão, 2014).

Os sistemas de simulação podem incluir uma das seguintes técnicas: propagação de onda elíptica (*elliptical wave propagation*), considerando o território como espaço contínuo (Anderson, 1982) e autómatos celulares (*cellular automaton*) ou percolação de ligação (*bond percolation*), considerando o território como um conjunto de células (Albright & Meisner, 1999).

2.6. Softwares de simulação do comportamento do fogo

Como referido na secção anterior, existem vários modelos de simulação do comportamento do fogo. Assim uma das tarefas deste trabalho foi selecionar o software mais adequado aos objetivos. Com base na análise de diversos programas, complementada por uma revisão da literatura especializada e uma avaliação preliminar das funcionalidades disponibilizadas, apresentam-se nesta secção as descrições detalhadas de cada software, bem como uma apreciação crítica das respetivas potencialidades e limitações.

2.6.1. FARSITE

O FARSITE (Simulador do comportamento e mapeamento do desenvolvimento do fogo) é um dos simuladores mais completos, apresentando uma grande complexidade que se deve ao facto de precisar de informação muito organizada na forma de mapas acompanhados de ficheiros de texto, o que requer mais tempo de simulação e dificuldade de manuseamento. No entanto, pode ser válido na extinção e previsão dos incêndios, sempre que se disponha da informação de entrada mínima exigida. Possibilita a exportação dos dados para um ambiente SIG onde podem ser tratados.

A aplicação deste software foi descartada devido à necessidade de dados com elevada resolução temporal, que não se encontravam disponíveis para o presente estudo.

2.6.1. BehavePlus

O software BehavePlus (Sistema de modelação de fogos) caracteriza-se por ser bastante completo e apresentar uma interface de fácil utilização e rápida capacidade de processamento. Não recorre a dados provenientes de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), pelo que os dados de entrada são introduzidos em formato textual e não sob a forma de mapas.

Os resultados gerados são representações gráficas, tabelas e diagramas. No entanto, devido à utilização dos dados em formato de texto sem referência espacial, os outputs não vão fornecer informação à escala da paisagem, não sendo possível a geração de mapas que representem a distribuição espacial do comportamento de fogo.

Apesar desta limitação, o software revela-se útil para uma interpretação rápida do comportamento do fogo e pode funcionar como ferramenta complementar em trabalhos gerais. Oferece funcionalidades adicionais, como o cálculo da humidade do combustível morto e a avaliação de modelos de combustíveis, podendo assim complementar outros programas de simulação de incêndios. Contudo, este software não foi selecionado para o presente estudo, uma vez que não fornece outputs à escala da paisagem nem permite a geração de mapas representativos da dinâmica do fogo.

2.6.2. NEXUS

O programa NEXUS (Sistema de modelação de fogos) apresenta uma interface principal intuitiva, que facilita significativamente a sua utilização. Destaca-se pela sua utilidade enquanto ferramenta de apoio ao estudo do risco potencial de incêndio em copas, bem como na avaliação de estratégias alternativas para o combate a este tipo de incêndios.

Adicionalmente, fornece as variáveis fundamentais do comportamento do fogo sob a forma de gráficos, tabelas e diagramas, permitindo uma análise clara e estruturada. A sua aplicação revela-se particularmente útil na análise de cenários específicos, possibilitando a interpretação rápida dos resultados, tanto em contextos de fogo de copas como de fogo de superfície.

No entanto, este software não foi selecionado para o presente estudo, uma vez que não fornece informação à escala da paisagem nem permite a geração de mapas espaciais representativos da propagação do incêndio.

2.6.3. Visual Behave

Este simulador pode ser considerado uma adaptação dos sistemas desenvolvidos para a análise do comportamento do fogo nos Estados Unidos da América e no Canadá ao contexto mediterrânico. Integra os modelos de combustível clássicos de Rothermel (utilizados pelo *Instituto para la Conservación de la Naturaleza*), bem como os modelos UCO 40, que permitem uma caracterização mais precisa dos combustíveis típicos destas regiões. O software apresenta uma interface intuitiva, sendo relativamente fácil de utilizar e revela-se bastante completo para a realização de simulações pontuais. No entanto, trata-se de um modelo determinístico, sem referência espacial explícita.

Os parâmetros de entrada requeridos incluem os modelos de combustível, as condições meteorológicas e a topografia. A base teórica do simulador assenta na equação de propagação de Rothermel, nos modelos de previsão de focos secundários de Albini, nos modelos de transição do fogo para as copas de Van Wagner, bem como nos modelos de combustível clássicos e nos modelos mediterrânicos mais recentes (UCO 40). A aplicação dispõe de uma janela principal onde são introduzidos os dados de entrada, dependendo dos outputs pretendidos. A partir destes, o software realiza os cálculos necessários e apresenta os parâmetros correspondentes.

Este simulador não foi selecionado para o presente estudo, uma vez que não fornece informação à escala da paisagem nem gera cartografia que represente a evolução do incêndio.

2.6.4. FlamMap

Neste estudo, o software utilizado foi o FlamMap na versão 6 (Finney, 2023). Este software foi criado pelos Serviços Florestais dos Estados Unidos da América (USFS) em 2003. Este software é um sistema de mapeamento e análise que descreve o comportamento potencial do incêndio sob condições ambientais constantes (como clima e humidade do combustível), sendo capaz de simular características como taxa de propagação, comprimento da chama, intensidade da linha de fogo, crescimento e propagação do incêndio, além de probabilidades condicionais de queima (Finney, 2006; Finney, 2023).

O cálculo do comportamento do fogo é realizado de forma independente para cada célula da paisagem simulada. Esta paisagem resulta da integração de diversos temas, nomeadamente a altitude, o declive, a exposição solar, os tipos de combustível e a cobertura de copas. Esta composição permite a simulação de ignições em pontos específicos ou de forma aleatória, oferecendo ainda a possibilidade de simular a propagação do fogo em toda a paisagem de forma simultânea.

Os cálculos do comportamento potencial do fogo abrangem a propagação de um fogo na superfície, o comprimento da chama e o tipo de atividade do fogo na copa. Este cálculo relaciona a humidade do combustível morto, a condição dos combustíveis

mortos em cada célula com a inclinação, sombreamento, elevação, a exposição das vertentes e o clima (Finney, 2023).

O FlamMap inclui os módulos FARSITE, o FlamMap BASIC (Finney, 2002; Finney, 2006), o *Minimum Travel Time* (MTT) (Finney, 2001, 2006, 2007) e *Conditional Burn Probability* (Finney, 2001, 2005, 2006). O programa incorpora os seguintes modelos de comportamento do fogo (Finney, 2023):

1. Modelo de propagação de fogo de superfície de Rothermel (1972);
2. Modelo de iniciação de fogo de copa de Van Wagner (1977);
3. Modelo de propagação de incêndios florestais de Rothermel (1991);
4. Modelo de observação de Albini (1979);
5. O método de cálculo de incêndio de copa de Finney (1998), (Finney, 1998) ou Scott e Reinhardt (2001);
6. O modelo de humidade de combustível morto de Nelson (2000).

2.6.5. Modelos de combustível

Os modelos de combustível são importantes pelo facto de formarem um conjunto de materiais vegetais diversos que, dependendo das condições ambientais prevalecentes, regulam os efeitos do fogo no desenvolvimento de um incêndio florestal. Esses modelos influenciam a taxa de combustão, a taxa de propagação, a quantidade de energia liberada (calor libertado), a altura das chamas e a modalidade de transferência de calor (Rothermel, 1972). O tipo de combustíveis presentes no terreno é um dos fatores mais importantes na determinação do comportamento do fogo. A sua classificação é essencial para identificar o potencial risco de incêndio (Lopes *et al.*, 2002). De acordo com Anderson (1982), a aplicação dos modelos matemáticos de (Rothermel, 1972) para simular o comportamento potencial do fogo exige a caracterização das propriedades físico-químicas dos combustíveis. Estas propriedades determinam a probabilidade de ignição, a quantidade de energia libertada pelo fogo e, consequentemente, o seu comportamento potencial e a dificuldade de controlo.

A descrição da vegetação dos espaços florestais em modelos de combustível, ou seja, através de um conjunto de parâmetros numéricos utilizáveis em modelos de predição

do comportamento do fogo, é essencial para a gestão global do fogo. Esta abordagem é particularmente importante nas fases de prevenção, pré-supressão, supressão e utilização controlada do fogo (Fernandes *et al.*, 2016). Segundo Lopes *et al.* (2002) a natureza dos combustíveis presentes no terreno é um dos fatores mais críticos na determinação do comportamento do fogo. Esta classificação é essencial para identificar o risco potencial de um incêndio, permitindo uma avaliação precisa e a implementação de estratégias eficazes de prevenção e combate ao fogo.

Os modelos de combustível mais frequentemente utilizados foram desenvolvidos na década de 1970 pelo Northern Forest Fire Laboratory (NFFL) do USDA Forest Service (Anderson, 1982). Este conjunto inclui 13 modelos de combustível, que são classificados em quatro categorias principais: vegetação herbácea, matos, folhada e resíduos de exploração.

Até recentemente, o modelo mais utilizado na Europa do Sul (Espanha, Portugal, Itália, Grécia) para simular o comportamento do fogo consistia numa adaptação dos 13 modelos desenvolvidos pelo NFFL (Anderson, 1982) para a região da Galiza em Espanha (ICONA, 1991). Recentemente, esta adaptação foi atualizada com a adição de mais 40 modelos (Scott & Burgan, 2005) para atender à necessidade de prever o comportamento do fogo em situações mais específicas. Isso inclui a previsão com maior precisão do comportamento do fogo fora dos períodos críticos e classificar combustíveis que queimam com um teor de humidade mais elevado. Além disso, houve um aumento no número de modelos para resíduos florestais (Dias, 2023).

Em síntese, estes modelos foram desenvolvidos de modo a abranger uma vasta gama de combinações possíveis dos descritores numéricos do complexo combustível. Além disso, visam incluir a maioria dos cenários observados em regiões florestais, de mato e de pastagens na zona temperada (Mérida, 2010). Contudo, esses modelos são inadequados para descrever toda a diversidade de complexos combustíveis presentes em Portugal. A partir dessa base inicial foram desenvolvidos modelos que caracterizam com maior precisão a diversidade de complexos combustíveis presentes no país. Cruz (2005) criou 14 modelos específicos para a Região Centro de Portugal, enquanto Fernandes and Loureiro (2022) desenvolveram 18 modelos para Portugal Continental.

2.6.6. Percentagem de cobertura de copas

A percentagem de cobertura de copas é uma variável que descreve o estado das árvores, correspondendo à projeção horizontal das copas na superfície. A cobertura de copas é crucial, pois influencia na redução da velocidade do vento e no teor de umidade do combustível (Finney, 2006).

3. Área de estudo: o Alto Minho

3.1. Caracterização geral

A área de estudo é a sub-região do Alto Minho NUT III (Nomenclatura de Unidade Territorial para Fins Estatísticos) integrante da NUT II Norte. Esta localiza- se no extremo noroeste de Portugal Continental, fazendo fronteira a Norte e a Este com a região da Galiza-Espanha, a Sul com a sub-região Cávado e a Oeste com o Oceano Atlântico. Uma das características marcantes desta região são as suas áreas naturais, que incluem diversas paisagens protegidas, como o Parque Nacional da Peneda-Gerês e zonas integradas na Rede Natura 2000. Esta sub-região tem uma área total de 2 218,84 km² e segundo os Censos 2021 tem 231 266 habitantes (INE, 2021). É composto por 10 municípios: Arcos de Valdevez, Caminha, Melgaço, Monção, Paredes de Coura, Ponte da Barca, Ponte de Lima, Valença, Viana do Castelo e Vila Nova de Cerveira (Figura 4).

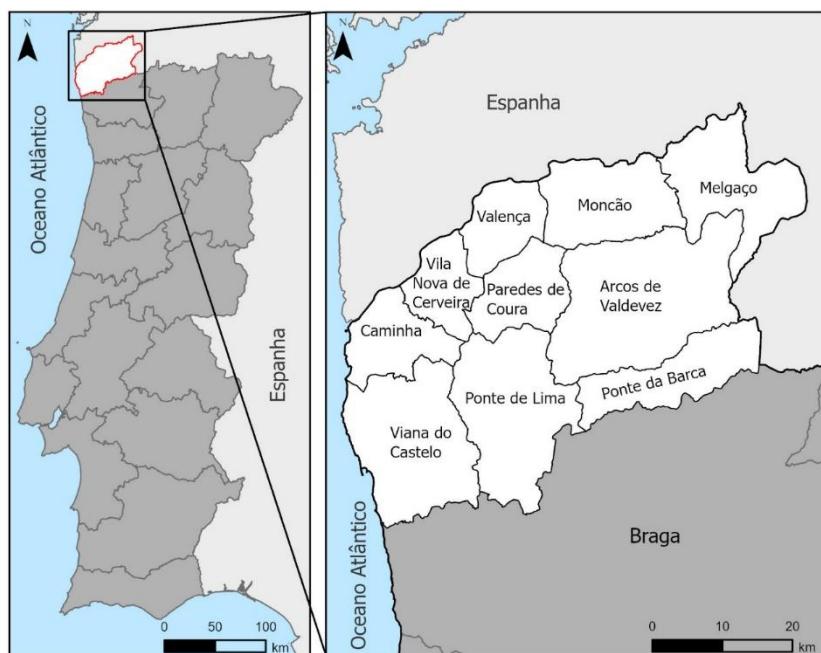


Figura 4. Localização do Alto Minho e dos municípios integrantes.

Fonte: Carta Administrativa Oficial de Portugal, 2023 Direção Geral do Território (<https://www.dgterritorio.gov.pt/cartografia/cartografia-tematica/caop>).

3.2. Morfologia e paisagem

A sub-região do Alto Minho é composta por 5 unidades de paisagem que integram o grupo de unidades de paisagem do Entre Douro e Minho (Oliveira *et al.*, 2004) (Figura 5) sendo elas: Vale do Minho, Entre Minho e Lima, Vale do Lima, Entre Lima e Cávado e Serras da Peneda e Gerês.

Tendo em conta que a sub-região integra diferentes unidades de paisagem é observar-se uma grande heterogeneidade na paisagem, onde se destacam os contrastes entre os Vales do Minho e do Lima e as áreas montanhosas das serras da Peneda-Gerês. Observam-se diferenças significativas entre as Serras da Peneda, Soajo e Amarela, bem como o Planalto de Castro Laboreiro e os respetivos vales dos dois principais rios. Adicionalmente, destaca-se a presença de extensas áreas rurais, tanto de carácter agrícola como florestal.

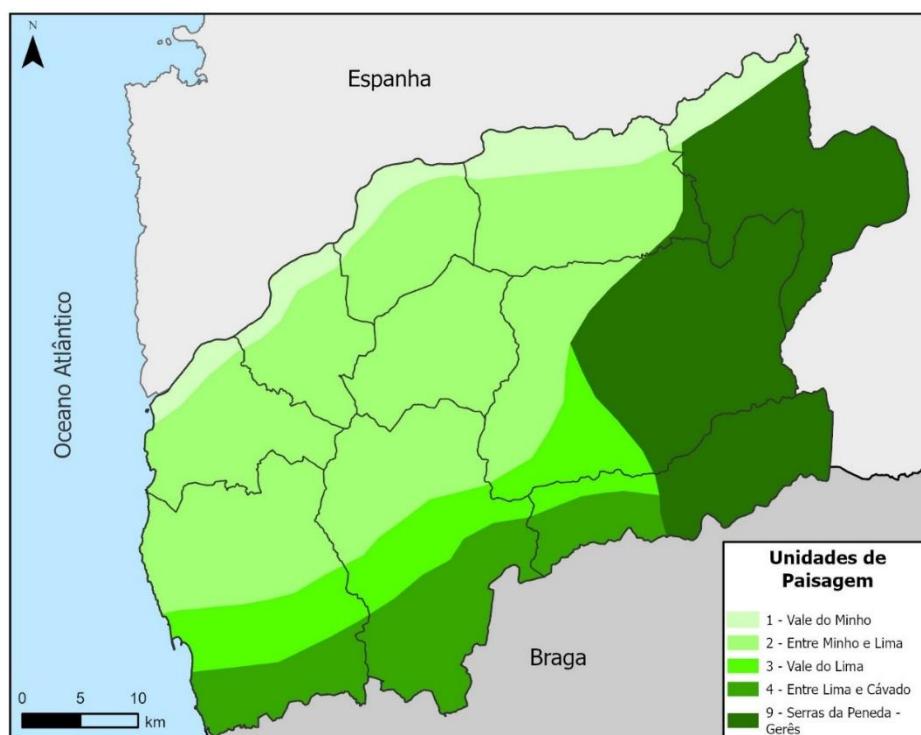


Figura 5. Unidades de paisagem do Alto Minho.

Fonte: Direção Geral do Território (<https://www.dgterritorio.gov.pt/paisagem/unidades-paisagem>) adaptado Oliveira *et al.* (2004).

A hipsometria da sub-região do Alto Minho revela uma área de contrastes morfológicos significativos. A nordeste, destacam-se as serras, como a Serra d'Arga e a Serra do Soajo, que apresentam altitudes elevadas. Em contraste, os fundos dos vales dos rios Minho, Lima e Vez, são caracterizados por altitudes mais reduzidas e terrenos mais planos. A oeste, a plataforma litoral apresenta uma topografia aplanada e de baixa altitude.

Os dados da hipsometria foram reclassificados segundo a classificação do ICNF (Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas) da metodologia da Carta de Perigosidade (ICNF, 2020). As áreas de elevação inferior a 100 metros são predominantes, representando aproximadamente 24,8% da superfície total, localizadas principalmente no litoral e nos vales centrais ao longo dos rios Minho e Lima. Mais de 50% da área possui altitudes inferiores a 300 metros. À medida que se avança para o interior da sub-região, observa-se um aumento gradual na altitude, uma vez que nos aproximamos das Serras do nordeste de Portugal. Próximas do litoral, destacam-se áreas montanhosas de maior altitude, como a Serra de Santa Luzia (Viana do Castelo), com aproximadamente 470 metros, e a Serra d'Arga (Viana do Castelo, Caminha e Ponte de Lima), com 825 metros de altitude. No interior, encontra-se a Serra do Soajo (1 416 metros), a Serra Amarela (1 362 metros), a Serra da Peneda (1 340 metros) e o Planalto de Castro Laboreiro (1 060 metros de altitude máxima). Mais de 12% da área de estudo possui altitudes superiores a 800 metros (Figura 6).

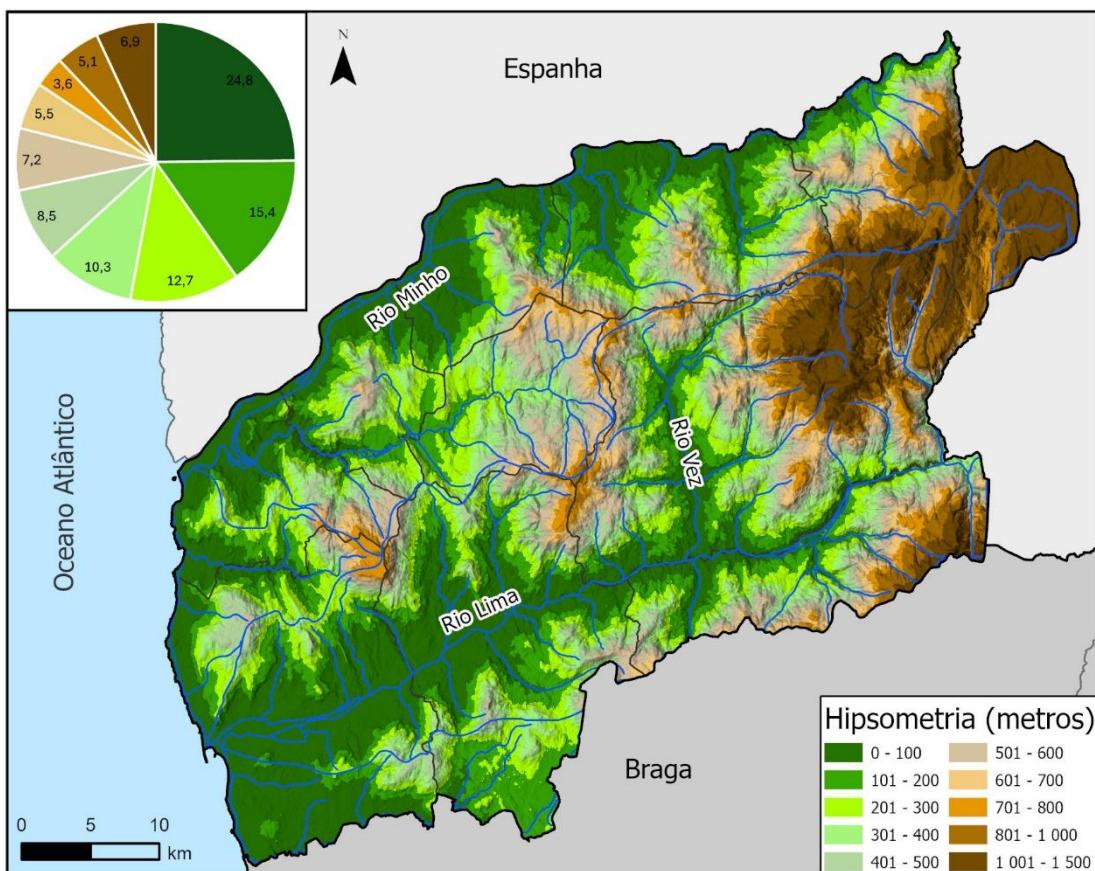


Figura 6. Classes hipsométricas (em metros) do Alto Minho.

Fonte: DEM para Portugal, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (<https://www.fc.up.pt/pessoas/jagoncal/dems/>); Open Street Map 2025 (<https://download.geofabrik.de/europe.html>).

Os dados dos declives foram reclassificados de acordo com a classificação utilizada pelo Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF) na metodologia da Carta de Perigosidade (ICNF, 2020). O mapa de declives (Figura 7) confirma a grande heterogeneidade da inclinação das vertentes. Os vales dos rios Minho, Lima e Vez destacam-se como áreas de baixos declives ($0\text{--}5^\circ$ e $5,1\text{--}10^\circ$), ocupando 47,2% do território, caracterizadas por terrenos predominantemente planos ou ligeiramente inclinados. Essas áreas são altamente utilizadas para a agricultura, urbanização e infraestruturas. Em contrapartida, os maiores declives ($15,1\text{--}20^\circ$ e $>20^\circ$), que ocupam 30 % do território, estão concentrados nas serras da Peneda e do Gerês. Esses locais são

caracterizados por terrenos acidentados, que limitam a ocupação humana direta, mas favorecem a preservação de florestas naturais.

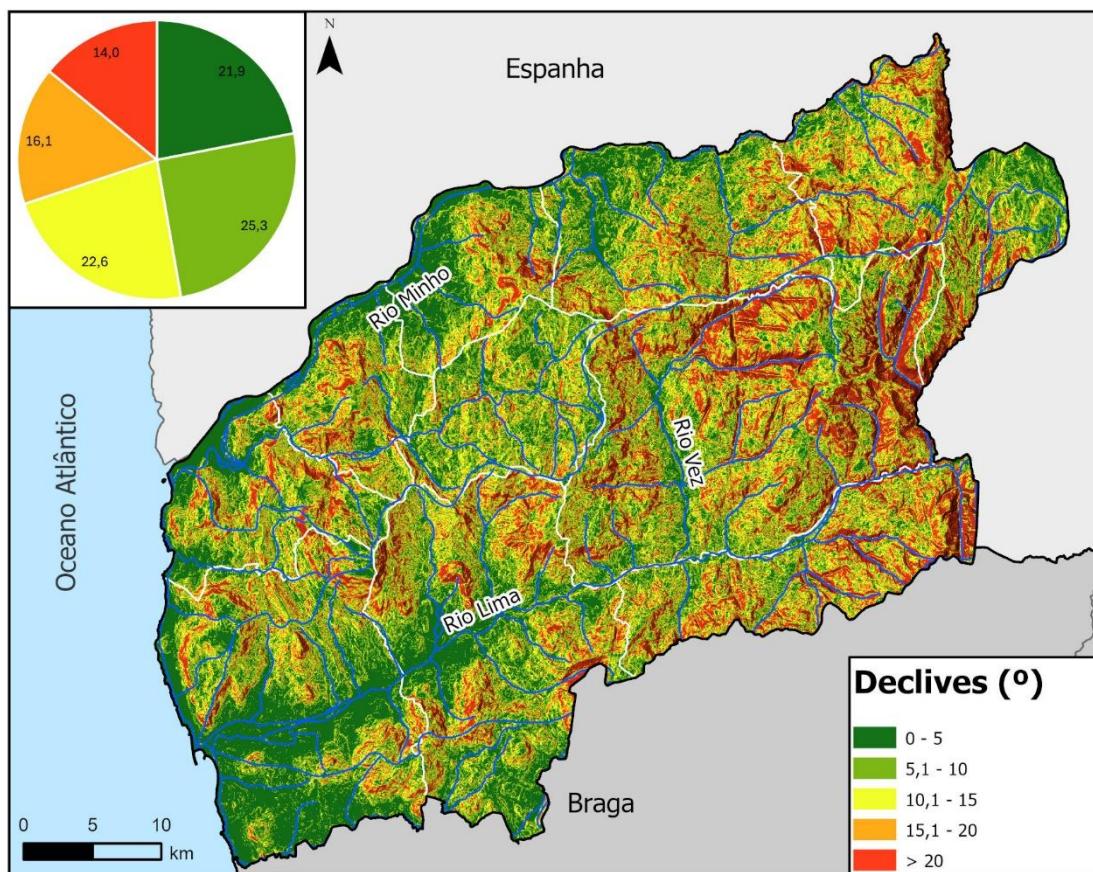


Figura 7. Declives (graus) Alto Minho.

Fonte: Calculado a partir do DEM para Portugal, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (<https://www.fc.up.pt/pessoas/jagoncal/dems/>);

Open Street Map 2025 (<https://download.geofabrik.de/europe.html>).

A exposição das vertentes no Alto Minho revela uma distribuição relativamente uniforme. As vertentes orientadas a oeste ocupam 16,6% do território, seguidas pelas vertentes a noroeste, que correspondem a 15%. As áreas planas são praticamente inexistentes, representando apenas 0,8% da área total. Além disso, observam-se padrões diferenciados entre as margens dos rios Lima e Minho. Na margem direita do rio Lima, predominam as vertentes expostas a sudeste, sul e sudoeste, refletindo uma maior incidência de radiação solar nessas áreas. Já na margem esquerda do rio Lima e

ao longo do rio Minho, predominam as vertentes voltadas para norte, nordeste e noroeste, caracterizando regiões menos expostas ao sol direto e, possivelmente, mais frescas e húmidas (Figura 8).

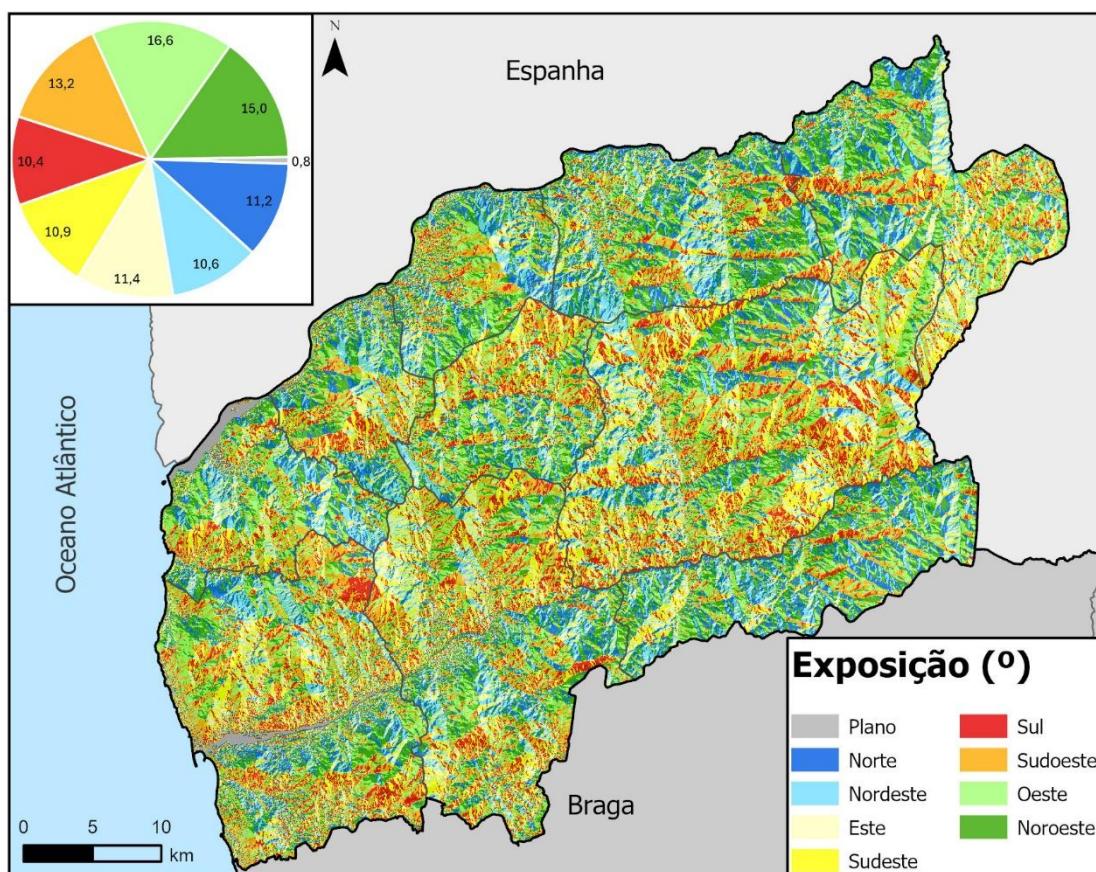


Figura 8. Exposição de vertentes, no Alto Minho.

Fonte: Calculado a partir do DEM para Portugal, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto (<https://www.fc.up.pt/pessoas/jagoncal/dems/>).

3.3. Caracterização climática

Os fatores climáticos são importantes para analisar e determinar o regime de fogo, não apenas pelas características climáticas de cada região, mas também pela influência que o clima tem no desenvolvimento da vegetação. Segundo a classificação climática de Köppen a sub-região do Minho encaixa-se no grupo C (Clima temperado) verificando-se o tipo Cs (Clima temperado com verão seco) e o subtípico é b (verão fresco). A classe climática Csb, segundo o sistema de Köppen-Geiger, caracteriza-se por um clima

temperado com verões secos e suaves. Este tipo de clima é predominante em grande parte das regiões situadas a norte do sistema montanhoso Montejunto-Estrela, bem como nas regiões costeiras ocidentais do Alentejo e do Algarve.

Com o objetivo de perceber como se comportam as principais variáveis climatológicas (temperatura e precipitação) na área de estudo, utilizámos o relatório das normais climatológicas de 1981 a 2010 para a estação da Meadela em Viana do Castelo (IPMA, 2022).

A temperatura média anual para esta série temporal é 15,2°C. Há um maior destaque para os meses de julho (20,8°C) e agosto (20,9°C) que são os meses em que as médias da temperatura média do ar são mais elevadas. Destacam-se também os meses de junho e setembro, ambos com uma temperatura média do ar de 19,2°C. Comparando os valores de temperatura dos meses assinalados com média anual é evidente que os verões são amenos a relativamente quentes. Sobressaem também os valores dos meses de janeiro (9,7°C), fevereiro (10,5°C) e dezembro (10,8°C) com os valores mais baixos de temperatura média diária do ar. Comparando os valores de temperatura destes meses com a temperatura anual média é evidente que os invernos são moderados nesta sub-região. Os restantes meses apresentam temperaturas mais amenas, sendo mais próximas da temperatura média anual (IPMA, 2022).

A temperatura máxima diária média anual é 20,2°C para toda a série temporal. Os meses com as temperaturas mais elevadas são julho (26,3°C) e agosto (26,4°C) seguidos pelos meses de junho (24,5°C) e setembro (24,8°C) que também apresentam temperaturas elevadas. Os meses com as temperaturas mais baixas são janeiro (14,6°C), fevereiro (15,5°C) e dezembro (15,2°C) podemos confirmar assim que os invernos são amenos. Os restantes meses apresentam temperaturas mais amenas, sendo mais próximas da temperatura média anual (IPMA, 2022).

A temperatura mínima média anual é 10,1°C. Destacando-se os meses de janeiro (4,9°C), fevereiro (5,5°C) e dezembro (6,4°C). Os meses com as temperaturas mais elevadas são julho (15,3°C) e agosto (15,1°C) seguidos pelos meses junho (13,9°C) e setembro

(13,7°C). Os restantes meses apresentam temperaturas mais amenas, sendo mais próximas da temperatura média anual (IPMA, 2022).

Em suma os invernos são moderadamente frios e concentram-se entre os meses de dezembro e fevereiro, enquanto os meses mais quentes vão de junho a setembro com destaque para os meses de julho e agosto que têm as temperaturas mais elevadas (IPMA, 2022).

O total da média da quantidade de precipitação total é 1466,3mm. Os meses que apresentam os valores mais elevados de precipitação são janeiro (180,8mm), outubro (190,0mm), novembro (199,9mm) e dezembro (213,3 mm). Os meses que apresentam menores valores de precipitação são junho (52 mm), julho (29,1mm) e agosto (38,5mm) (IPMA, 2022).

Concluindo, a sub-região do Minho apresenta um regime de chuvas marcado por um período de reduzida precipitação entre os meses de junho e agosto, e um período de precipitação intensa que vai de outubro a janeiro (IPMA, 2022).

No relatório da cartografia de regimes de fogo à escala da freguesia (1980 – 2017) da AGIF (Agência para a Gestão Integrada de Fogos Rurais), é apresentada a Figura 9 onde são apresentados os termoclimas para Portugal, enquanto a Figura 1010 apresenta os pluvioclimas (IPMA, 2022).

Segundo as classificações climáticas de IPMA (2022), o Alto Minho divide-se em três termotipos e dois pluviotipos, que correspondem às diferentes tipologias de temperatura e precipitação. Em relação à temperatura, o Alto Minho apresenta uma tipologia termotemperada nas áreas mais litorais e próximas aos vales dos rios Minho e Lima. Nas áreas montanhosas do centro e sudoeste, predomina uma tipologia mesotemperada. Nas áreas montanhosas das Serras da Peneda e Soajo e no Planalto de Castro Laboreiro, predomina uma tipologia supratemperada (Figura 9). Quanto à precipitação na sub-região, o litoral e as áreas ao longo dos rios Minho e Lima apresentam um clima húmido. Nas áreas montanhosas, predomina o clima hiper-húmido (Figura 10).

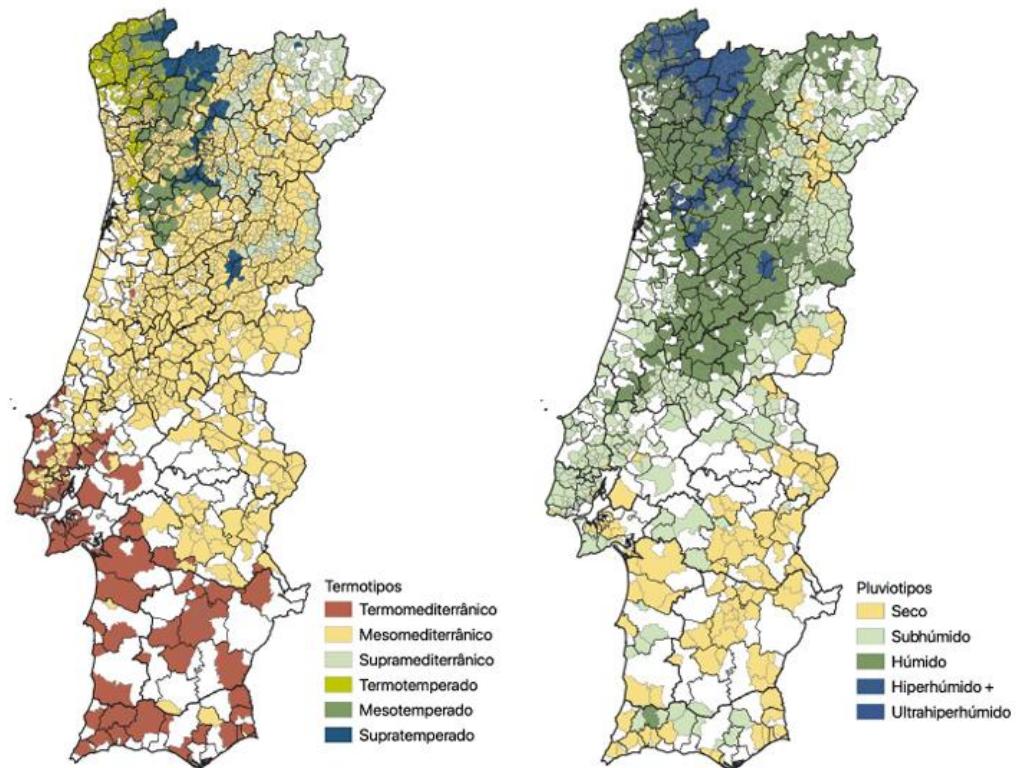


Figura 9. Tipos de termoclimas.

Fonte: Retirado de Pereira et al. (2022)

Figura 10. Tipos de pluvioclima.

Fonte: Retirado de Pereira et al. (2022)

3.4. Ocupação do solo e combustíveis florestais

A Figura 11 apresenta a distribuição das classes de uso e ocupação do solo ao nível 1 da nomenclatura COS de 2018 (DGT). Observa-se uma grande presença de áreas florestais com cerca de 42,4% da superfície, as áreas de matos ocupam 26,4% da área.

As zonas agrícolas, que totalizam 18,5% da área, são relevantes para a economia local, sobretudo na forma de pequenos campos em socalcos e na produção de vinho verde, típicos desta região. As pastagens, com 0,4%, surgem de forma mais residual, mas compõem o mosaico agropecuário, enquanto os espaços descobertos ou com pouca vegetação (2,6%) incluem áreas rochosas, dunas e areais, sobretudo em zonas costeiras ou de altitude.

Por fim, os territórios artificializados representam 8,3% da área. Estes resultam da presença de núcleos urbanos, áreas industriais, infraestruturas viárias e turísticas, espelhando o desenvolvimento humano na região.

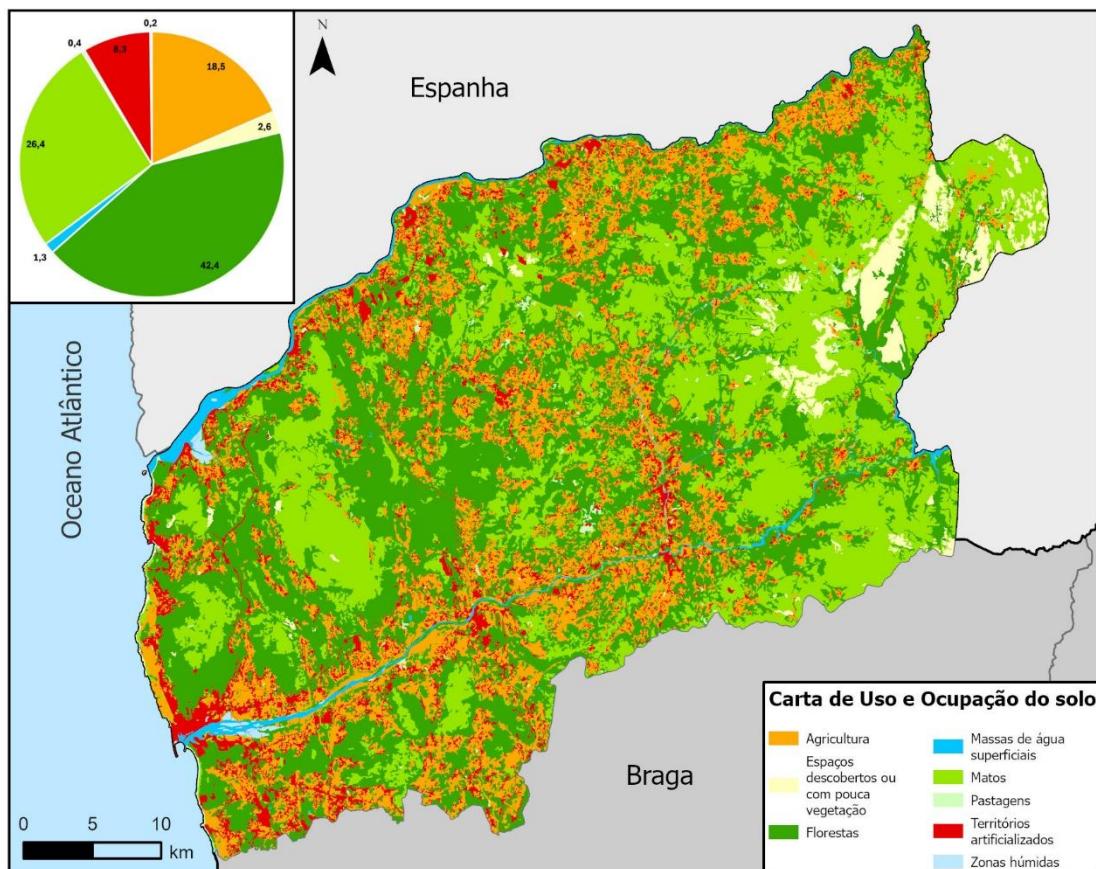


Figura 11. Carta de Uso e Ocupação do Solo 2018 (nível 1).

Fonte: Carta de Ocupação do Solo 2018, Direção Geral do Território (<https://snig.dgterritorio.gov.pt/rndg/srv/por/catalog.search#/search?anySnig=COS&fast=index>).

Com base na Figura 12, é possível identificar as classes de uso e ocupação do solo incineráveis, conforme o Nível 4 da COS. A Figura 13 apresenta a percentagem de área ocupada por classe da Carta de Uso e Ocupação do Solo 2018 incineráveis (nível 4). Os dados evidenciam que a região do Alto Minho possui uma paisagem heterogénea, marcada pela predominância de matos, áreas florestais e superfícies agrícolas.

Os matos destacam-se como a classe de maior ocupação, abrangendo aproximadamente 29,3% da área total, refletindo a presença significativa de vegetação arbustiva típica das zonas montanhosas e de encosta desta região. As florestas de

pinheiro-bravo constituem a segunda classe mais extensa, ocupando 17,0% da área. Seguem-se as florestas de eucalipto, que ocupam 13,4% da área. As florestas de outras folhosas abrangem 8,1% da área, enquanto as florestas de outros carvalhos ocupam 7,1% da área. Deste modo, é possível inferir que as florestas, ainda que repartidas por diferentes tipos, e os matos, ocupam uma porção substancial da sub-região.

As áreas agrícolas e os espaços com pouca vegetação apresentam menor representatividade na ocupação do solo em comparação com as florestas e os matos. Entre as classes pertencentes à agricultura, as culturas temporárias de sequeiro e regadio representam 13,4% da área. Esta classe abrange as culturas temporárias que não utilizam qualquer tipo de rega artificial e por culturas irrigadas de forma artificial permanentemente ou não, utilizando com frequência infraestruturas permanentes de rega. Este tipo de culturas pode também recorrer a estruturas de rega tradicionais. A agricultura com espaços naturais e seminaturais ocupa a segunda maior percentagem de área, com 2,3%. Segue-se a vinha, ocupando 2,3% da área, seguida pelos mosaicos culturais e parcelares complexos que ocupam 2% da área. Quanto aos espaços com pouca vegetação, destaca-se a vegetação esparsa, ocupando 2,6% da área total.

Nota-se também a existência de várias classes com muito reduzida representatividade na ocupação do solo, como as florestas de azinheira e as culturas temporárias e/ou pastagens melhoradas associadas ao olival.

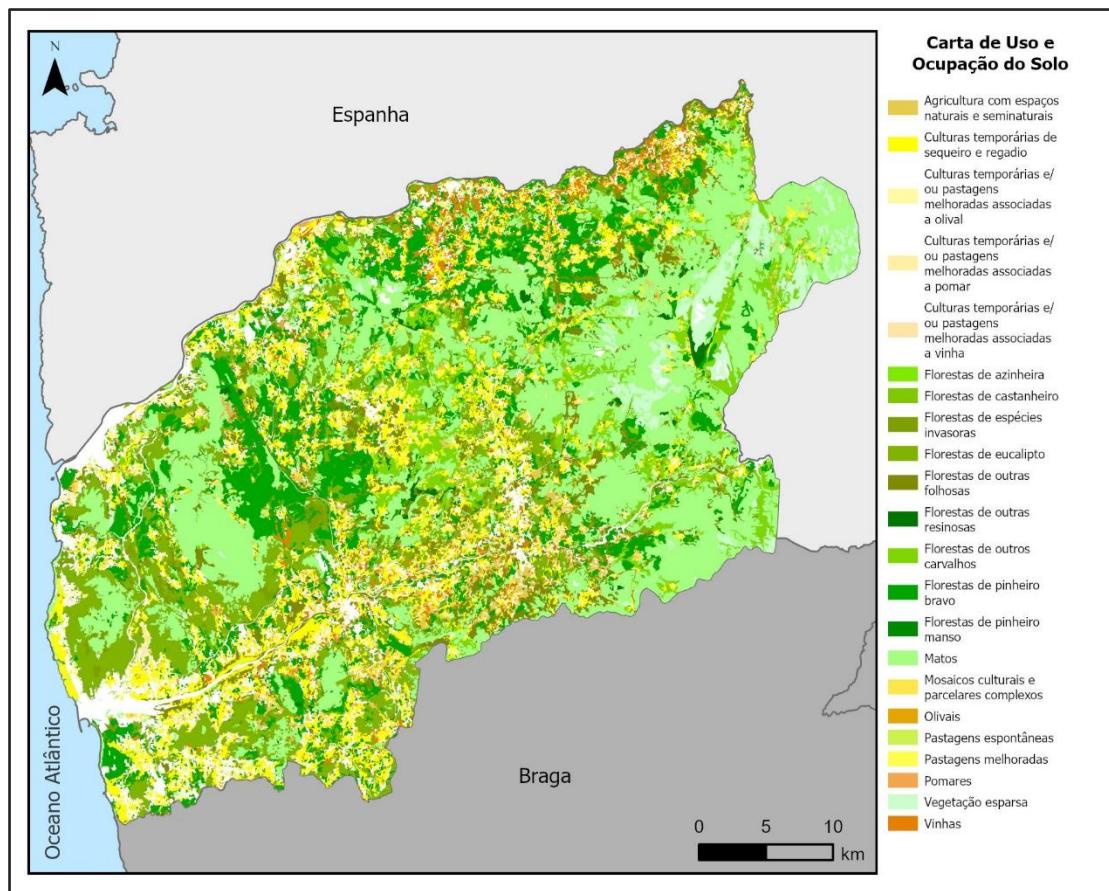


Figura 12. Classes da Carta de Uso e Ocupação do Solo incineráveis (nível 4).

Fonte: Carta de Ocupação do Solo 2018, Direção Geral do Território (<https://snig.dgterritorio.gov.pt/rndg/srv/por/catalog.search#/search?any:snig=COS&fast=index>).

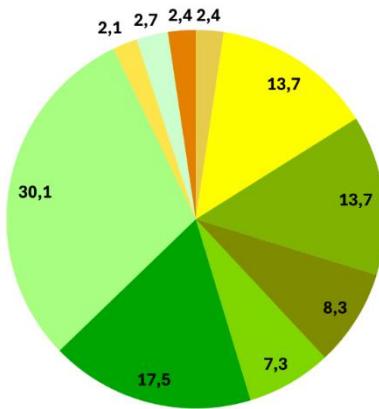


Figura 13. Percentagem de área ocupada por classe da Carta de Uso e Ocupação do Solo 2018 incineráveis (nível 4).

Fonte: Carta de Ocupação do Solo 2018, Direção Geral do Território (<https://snig.dgterritorio.gov.pt/rndg/srv/por/catalog.search#/search?anySnig=COS&fast=index>). Nota: ver legenda na figura 12.

A Figura 14 apresenta a percentagem de cobertura de copas para a sub-região. Esta foi obtida a partir da *Tree Cover Densitiy* do programa Copernicus com uma resolução de 100 x 100 metros para o ano de 2018. Com um ciclo de atualização trienal e dados de alta resolução, este destaca-se como um dos melhores mapas de cobertura arbórea disponíveis ao público na Europa. As suas áreas de aplicação são variadas, abrangendo desde o apoio a iniciativas continentais de monitorização da cobertura e uso do solo até ao suporte a projetos regionais de gestão florestal.

A Figura 14 revela uma distribuição diversa da cobertura de copas na sub-região. A maior parte da área da sub-região (36,0%) encontra-se desprovida de qualquer cobertura de copas, sugerindo a presença significativa de espaços urbanos, agrícolas, áreas desflorestadas ou superfícies naturais sem árvores, entre outras. A segunda maior parcela do território, representando 25,5%, possui uma cobertura de copas muito baixa (1-20%), indicando áreas onde as árvores estão presentes de forma dispersa, como em paisagens agrícolas com alguma arborização ou zonas urbanas arborizadas.

As áreas com cobertura moderada de copas, entre 21-50%, correspondem a 17,3% do território, revelando a existência de espaços onde a presença de árvores é mais significativa, embora ainda intercalada com espaços abertos. Por outro lado, 17% da área apresenta uma cobertura elevada de copas, entre 51-80%, característica de florestas mais densas ou matas bem desenvolvidas. Finalmente, apenas 4,2% do território possui uma cobertura de copas muito densa, entre 81-100%, evidenciando a existência de pequenos núcleos de floresta fechada, que podem corresponder a áreas de conservação, florestas autóctones bem preservadas ou zonas de acesso mais restrito.

Globalmente, observa-se que a maioria da região possui algum grau de cobertura arbórea, predominando a cobertura baixa a moderada (1-50%). As áreas de cobertura arbórea elevada (acima de 50%) representam cerca de 21% do território. Esta distribuição indica uma paisagem com mosaicos florestais, refletindo provavelmente uma combinação de usos do solo que integra agricultura, urbanização e espaços naturais. A presença expressiva de áreas sem cobertura arbórea e com cobertura esparsa sugere tanto a influência humana intensa como possíveis oportunidades para ações de reflorestação e melhoria da conectividade ecológica.

Segundo Sá *et al.* (2023) as florestas abertas são definidas como aquelas com uma percentagem de cobertura inferior a 40%, em que os combustíveis são predominantemente arbustivos.

Os dados da cobertura das copas foram reclassificados de acordo com a informação do software FlamMap (Finney, 2023).

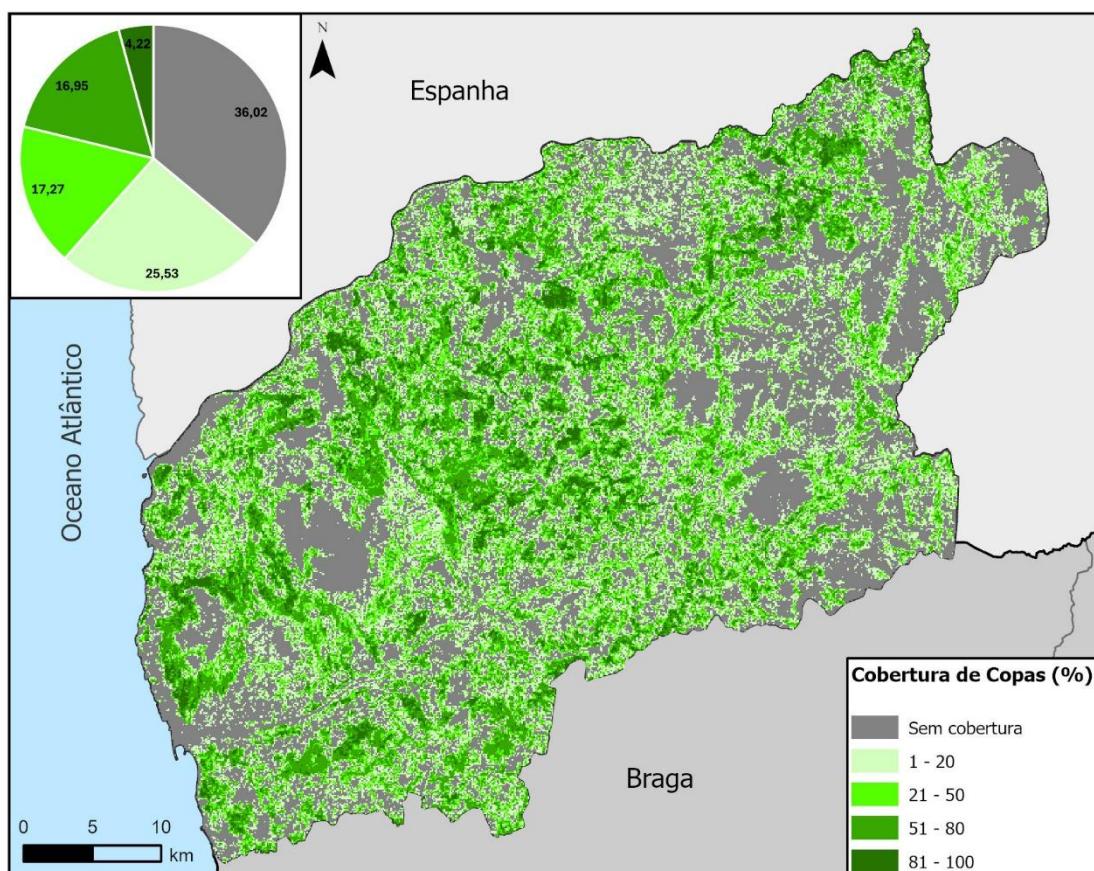


Figura 14. Percentagem de cobertura de copas no Alto Minho.

Fonte: Tree cover density (TCD): <https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/forests/tree-cover-density>

O modelo de combustível utilizado foi disponibilizado pelo Professor Paulo Fernandes, com uma resolução de 100 x 100 metros. Este modelo de combustível foi o resultado do estudo de Sá *et al.* (2023). A Figura 15 apresenta a distribuição dos modelos de combustível para a sub-região do Alto Minho, enquanto a Figura 16 apresenta a percentagem de ocupação da área que cada modelo ocupa. Tendo em conta os dados

referidos a classe dominante é o modelo 233 (V-MAa), ocupando 21,0% da área total, correspondente a matagais altos e densos. Segue-se o modelo 234 (V-Mab), representando 14,1%, característico de matos mais baixos. As florestas de espécies autóctones e regeneração natural, modelo 221 (M-CAD), cobrem 12,7%, enquanto as áreas classificadas como não combustíveis, modelo 98, abrangem 12,3% do território, destacando zonas urbanas, corpos de água e superfícies agrícolas de baixo risco de incêndio.

O modelo 231 (VHa), associado a vegetação herbácea alta, ocupa 10,9% da área, e o modelo 223 (M-EUC), correspondente a plantações de eucalipto, representa 11,1%. O pinhal, identificado como modelo 227 (M-PIN), constitui 5,5% da superfície analisada. Outras classes, como 235 (V-MH) (matagais heterogéneos), cobrem 8,6%, e 237 (V-Mb), 1,7%. Os modelos de menor expressão são o modelo 4 (NFL-Prb reg.) com 1,8%, modelo 224 (M-EUCd) com 0,2%, modelo 211 (F-EUC) com 0,1%, modelo 11 (NFL-Logging) com apenas 0,02%, e o modelo 238 (ADAI-Logging), praticamente residual com 0,0032%.

Este conjunto de modelos de combustível é composto por quatro diferentes categorias: os "*Modelos de Combustíveis Florestais para Portugal*", que abrangem os modelos de 211 a 237 (Fernandes & Loureiro, 2022); os "*Modelos de Combustíveis Florestais para a Região Centro de Portugal*" que incluem o modelo 238, correspondente ao modelo RESE-01 (Cruz, 2005); os Modelos de Combustível padrão da NFFL, que englobam os modelos 4 e 11 (Anderson, 1982); e os modelos não-combustíveis, representados pelo modelo 98 (Scott & Burgan, 2005).

No Anexo 1 é apresentada uma tabela com as descrições e as fotos representativas de cada modelo presente na sub-região do Minho.

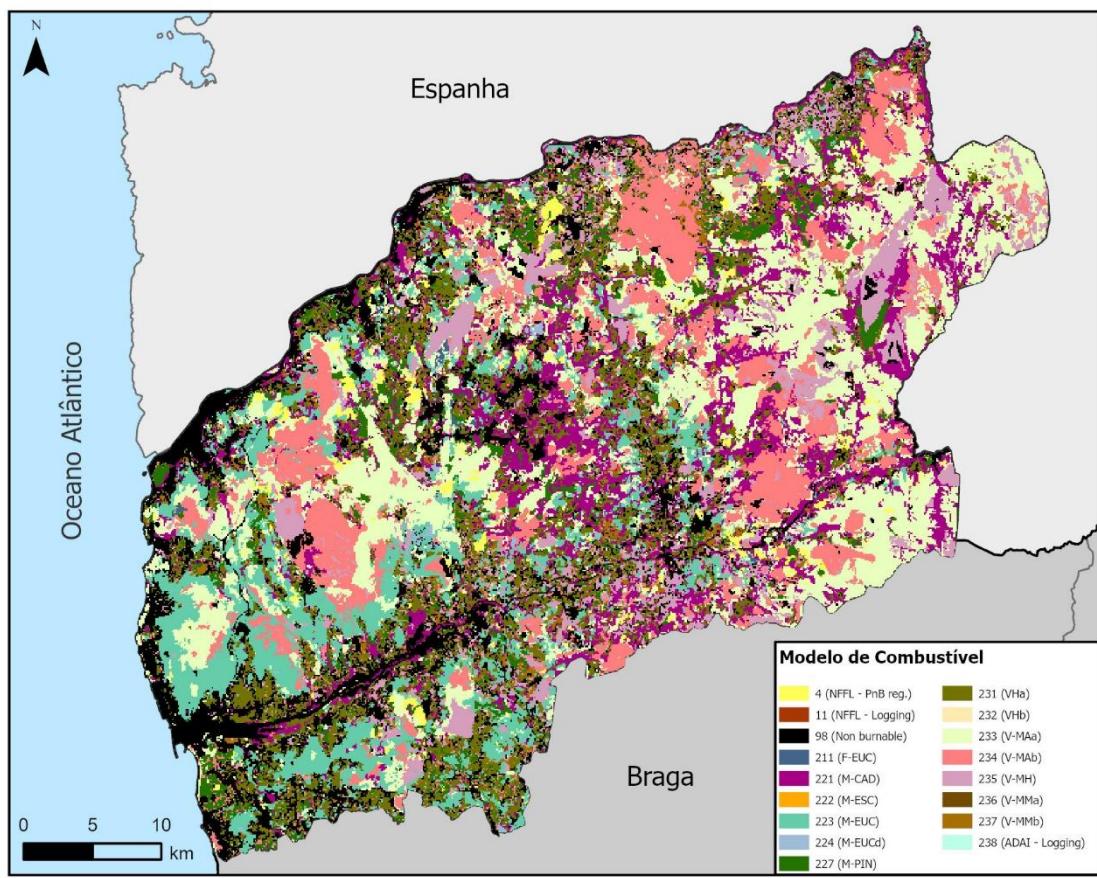


Figura 15. Distribuição dos modelos de combustível, no Alto Minho.

Fonte: Adaptado de Sá *et al.* (2023).

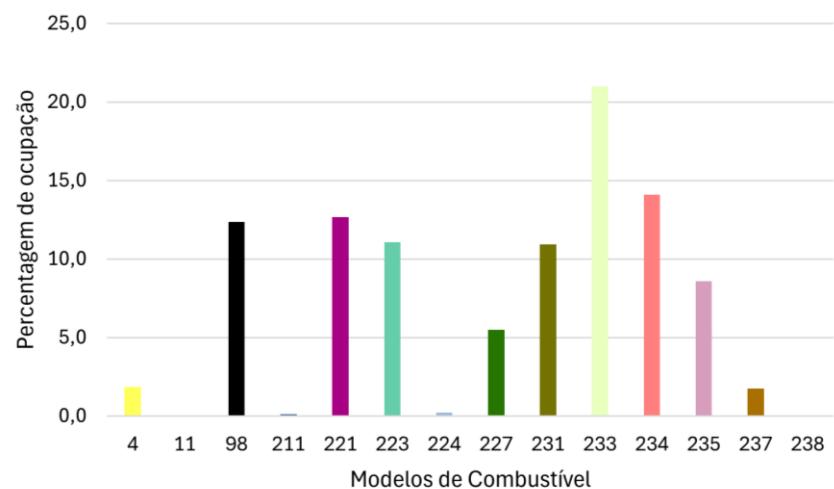


Figura 16. Percentagem de área ocupada por modelo de combustível.

3.5. Regime de fogo e histórico de incêndios rurais

A caracterização do regime de fogo apresenta-se como um instrumento importante na avaliação de risco, bem como uma ferramenta de apoio para a criação de políticas públicas de gestão integradas de fogo rural (Pereira *et al.*, 2022).

A caracterização está dependente dos padrões temporais e espaciais bem como dos padrões comportamentais do fogo, nomeadamente o tamanho a frequência a sazonalidade e a intensidade (Pereira *et al.*, 2022).

O regime de fogo da sub-região tem uma grande ligação com as características da ocupação do solo, nomeadamente nas áreas de alta montanha, onde se sobressai uma ocupação do solo predominantemente herbácea e arbustiva devido à alta recorrência de fogo na paisagem para efeitos de pastorícia (Oliveira & Fernandes, 2023) além da transformação de modelos de combustível de pinhal por modelos de combustível de eucaliptal (Pereira *et al.*, 2022).

O Alto Minho é abrangido por 4 macro regimes de fogo diferentes (Pereira *et al.*, 2022) e dentro deles podemos categorizar 6 regimes diferentes:

- I. 1A: Época de fogo longa, com uma elevada percentagem de incêndios de Inverno;
- II. 1B: Extensa área ardida com uma elevada recorrência;
- III. 2B: Ausência de grandes incêndios com uma baixa área ardida e um número regular de ignições de baixa intensidade;
- IV. 3B: Mega-incêndios com elevada área ardida;
- V. 3C: Ocorrência de alguns grandes incêndios e um baixo número de ignições;
- VI. 4B: Estação de fogo curta, baixa área ardida e ausência de grandes incêndios.

Segundo a categorização dos regimes de fogo proposta por Pereira *et al.* (2022), é possível concluir que os principais regimes do Alto Minho são os macro regimes 1 e 3 que incluem os sub-regimes 1A, 1B, 3B e 3C.

Na Figura 17 é possível ver como se distribuem estes regimes na sub-região. Sobressaem-se as zonas de montanha como os concelhos de Arcos de Valdevez, Ponte

da Barca e Melgaço, apresentam o macro regime 1. As zonas de eucaliptal e pinhal como os concelhos de Caminha, Viana do Castelo e Ponte de Lima apresentam incêndios mais intensos e esporádicos (regime 3).

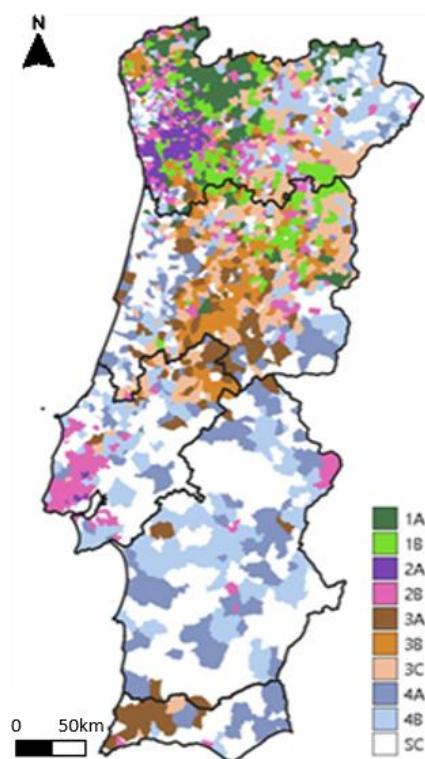


Figura 17. Classificação dos regimes de fogo para Portugal.

Fonte: Retirado de Pereira *et al.* (2022)

Nesta secção do trabalho apresenta-se um histórico dos últimos 20 anos (2003 até 2023) dos pontos de ignição, para analisar a sua distribuição espacial, variação anual e maior densidade de ignições por município. A partir desta análise pretende-se identificar os locais com maior frequência espaço-temporal de ocorrência de pontos de ignição, para identificar as áreas mais afetadas historicamente pelos incêndios rurais.

A Figura 18 ilustra o número de pontos de ignição na sub-região do Alto Minho, ao longo dos últimos 20 anos (2003 a 2023), evidenciando uma tendência global de redução ao longo do tempo. Inicialmente, observam-se grandes flutuações nos primeiros anos, seguidas de uma estabilização dos valores mais baixos a partir de 2016. O período entre 2003 e 2010 é marcado por oscilações acentuadas no número de ignições, com os

maiores valores no ano de 2005, ultrapassando as 2500 ignições (2597), e em 2010, com valores acima de 2000 ignições (2269). Entre esses picos, verificou-se uma redução considerável, como em 2008, quando o número de ignições caiu para 691. No período de 2011 a 2015, observa-se outro pico em 2011 com o número de ignições próximo das 2500 (2428), mas, a partir de 2013, há uma descida acentuada no número de ignições. Este período marca o início de uma tendência decrescente mais consistente.

A partir de 2016, o número de ignições estabiliza em níveis significativamente mais baixos em comparação com os anos anteriores. O ano de 2019 apresenta baixo número de ignições (556). Entre 2021 e 2023, o número de ignições mantém-se relativamente estável, com um ligeiro aumento em 2022, seguido de uma nova redução em 2023.

A Figura 19 apresenta a distribuição total do número de pontos de ignição por concelho, evidenciando diferenças significativas na frequência de ignições de incêndios rurais. De uma forma geral, os concelhos de Ponte de Lima (5.650 ignições), Viana do Castelo (5.200 ignições) e Arcos de Valdevez (4.935 pontos) concentram o maior número de ignições, enquanto Vila Nova de Cerveira (938 pontos), Melgaço (1.060 ignições) e Caminha (1.773 pontos) registam os valores mais baixos.

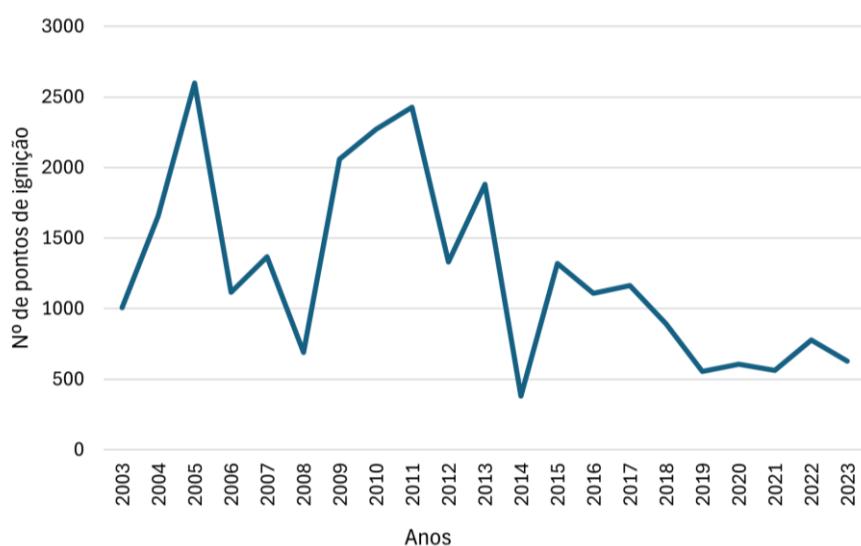


Figura 18. Evolução dos pontos de ignição no Alto Minho (2003 a 2023).

Fonte: Registos individuais de incêndios 2001 a 2023, Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (<https://sig.icnf.pt/portal/home/item.html?id=36f9c2fbb424f9882cbd0c9126777b4&fromSearch=true&searchPosition=12&searchTerm=&searchFacet=card+dropdown+item+details>).

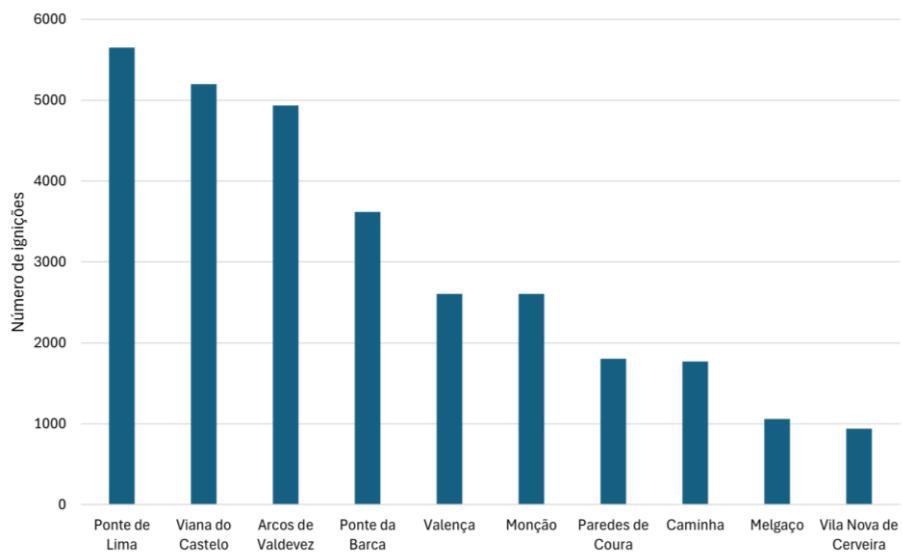


Figura 19. Número de pontos de ignição por município.

Fonte: Registos individuais de incêndios 2001 a 2023, Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (<https://sig.icnf.pt/portal/home/item.html?id=36f9c2fbb424f9882cbd0c9126777b4&fromSearch=true&searchPosition=12&searchTerm=&searchFacet=card+dropdown+item+details>).

A Figura 20 ilustra a evolução do número de ignições ao longo dos últimos 20 anos (2003 e 2023) nos municípios do Alto Minho. Entre 2005 e 2017, registaram-se picos acentuados de ignições, com destaque para os anos de 2007, 2009, 2013, 2015 e 2017, indicando uma elevada incidência de ignições nesses períodos. Após 2017, observa-se uma redução significativa no número de ignições na maioria dos municípios.

Ponte de Lima e Viana do Castelo destacam-se com os valores mais elevados ao longo dos anos, frequentemente ultrapassando as 400 ignições anuais, evidenciando uma maior suscetibilidade a incêndios rurais. Em contraste, municípios como Vila Nova de Cerveira e Melgaço apresentam valores mais baixos de ignições, sugerindo uma menor suscetibilidade a ignições de incêndios rurais.

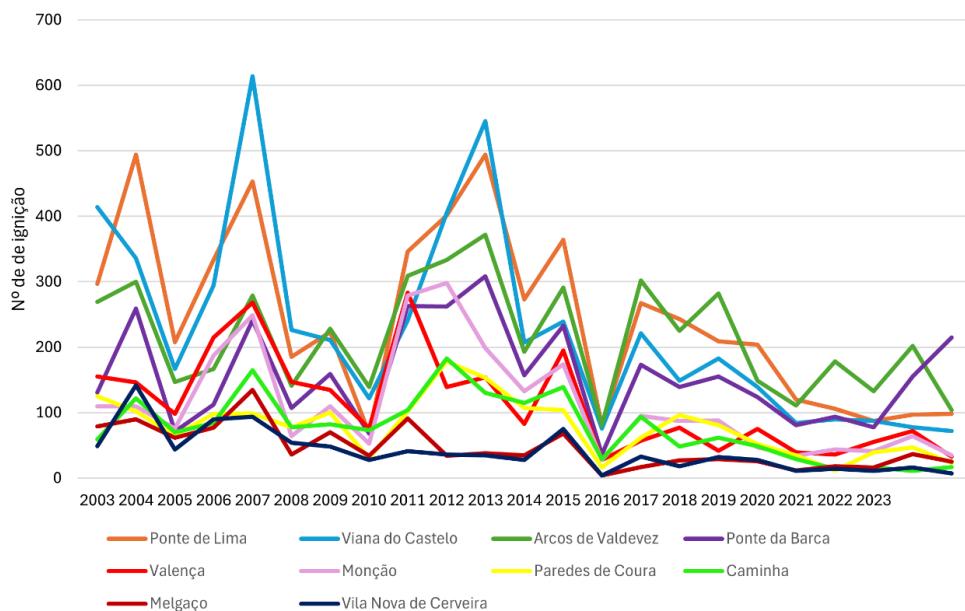


Figura 20. Evolução anual do número de pontos de ignição nos municípios do Alto Minho (2003 a 2023).

Fonte: Registos individuais de incêndios 2001 a 2023, Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (<https://sig.icnf.pt/portal/home/item.html?id=36f9c2fbb424f9882cbd0c9126777b4&fromSearch=true&searchPosition=12&searchTerm=&searchFacet=card+dropdown+item+details>).

A Figura 21 apresenta a densidade de pontos de ignição para o conjunto dos 20 anos para a sub-região. Os maiores valores de densidade (>20 ignições/km²) concentram-se sobretudo no sudoeste do município de Arcos de Valdevez, onde se encontram os valores máximos de densidade, uma vez que os valores de densidade vão diminuindo à medida que nos afastamos do centro. Os municípios de Ponte de Lima e Viana do Castelo também se destacam pelos altos valores de densidade. Nos municípios de Monção, Valença e Paredes de Coura encontra-se uma concentração de pontos de ignição com uma densidade superior a 12 ignições/km². Por outro lado, a este da área de estudo registam-se os valores mais baixos de densidade (<2 ignições/km²), destacando-se o município de Melgaço.

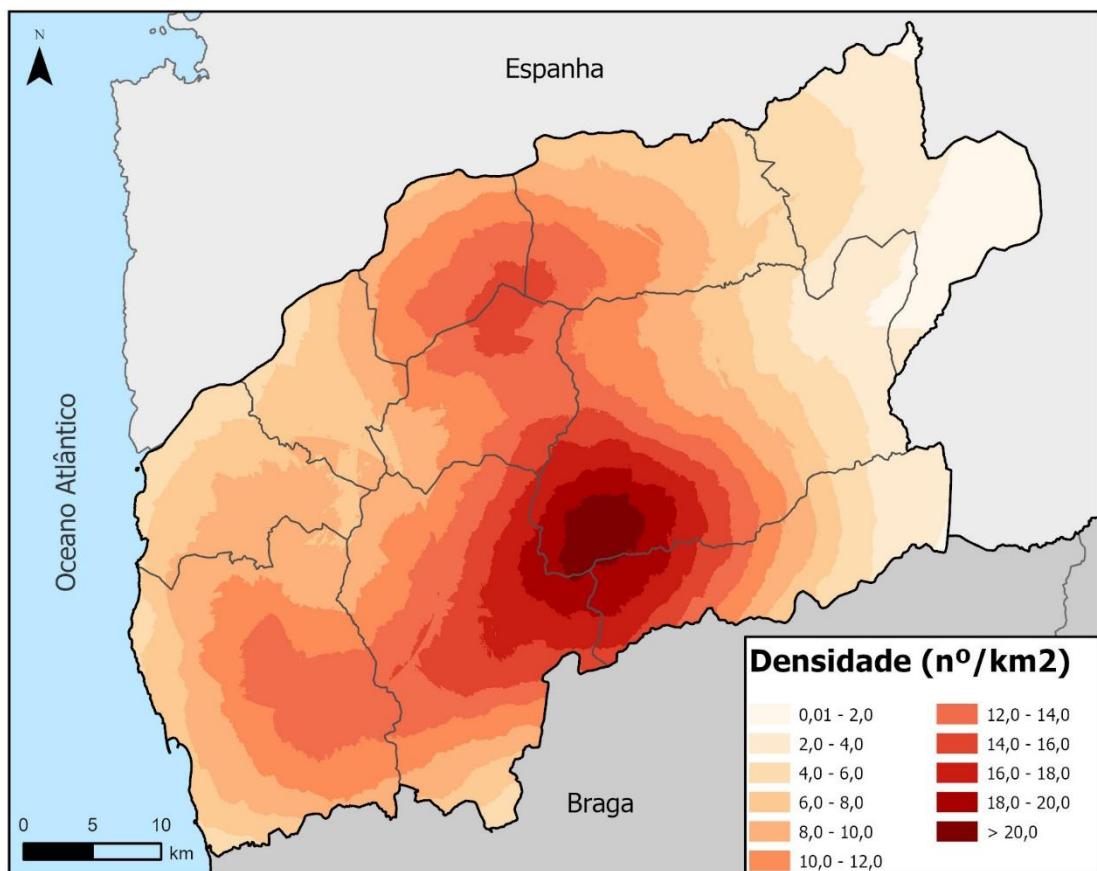


Figura 21. Densidade dos pontos de ignição para os 20 anos (2003 a 2023).

Fonte: Registos individuais de incêndios 2001 a 2023, Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (<https://sig.icnf.pt/portal/home/item.html?id=36f9c2fb8b424f9882cbd0c9126777b4&fromSearch=true&searchPosition=12&searchTerm=&searchFacet=card+dropdown+item+details>).

A Figura 22 apresenta o número de ignições por meses para o histórico de 20 anos (2003 a 2023). Agosto é o mês com mais ignições (7 243 ignições), seguido pelo mês de setembro e julho, com 4 701 e 4 628 ignições, respetivamente. Os meses de janeiro (413 ignições), novembro (826 ignições) e dezembro (381 ignições) apresentam os valores mais baixos de ignições no período em análise. Os meses de março e junho também se destacam com mais de 2000 ignições.

Em suma, a maioria dos pontos de ignição concentram-se nos meses com temperatura média mais elevada e precipitação total mais baixa, havendo condições mais favoráveis de ignição e propagação de incêndios. Os meses com menos pontos de ignição são os

que reúnem condições de temperatura média mais baixa e precipitação total mais elevada, criando condições de maior humidade, que dificulta a ignição.

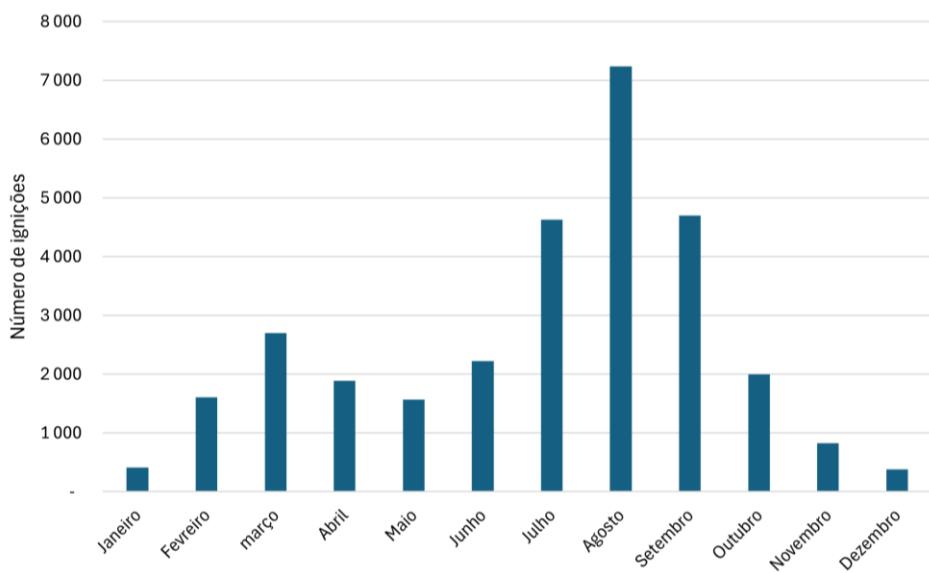


Figura 22. Número de pontos de ignição por mês.

Fonte: Registos individuais de incêndios 2001 a 2023, Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (<https://sig.icnf.pt/portal/home/item.html?id=36f9c2fb8424f9882cbd0c912677b4&fromSearch=true&searchPosition=12&searchTerm=&searchFacet=card+dropdown+item+details>).

A Figura 23 ilustra a probabilidade anual de ocorrência de incêndios calculada a partir das áreas ardidas na sub-região do Alto Minho. A maior parte da área apresenta uma probabilidade anual de incêndios igual a zero, correspondendo principalmente a áreas urbanas, vales dos rios Minho e Lima, e zonas próximas do litoral.

A classe de probabilidade anual entre 0,01 e 0,1 é a segunda mais predominante na sub-região, afetando predominantemente áreas interiores com vegetação densa, como matos, áreas agrícolas e algumas áreas florestais. A classe de probabilidade entre 0,11 e 0,2, concentra-se principalmente em áreas florestais e de grande altitude, como a Serra de Arga e a Serra de Santa Luzia. A classe de probabilidade entre 0,21 e 0,3 está dispersa pela sub-região, destacando-se em locais como as Serras de Arga e Santa Luzia, no noroeste do concelho de Arcos de Valdevez e no sudoeste de Valença. A classe com probabilidade superior a 0,3 é observada no nordeste de Arcos de Valdevez e no sudoeste de Valença.

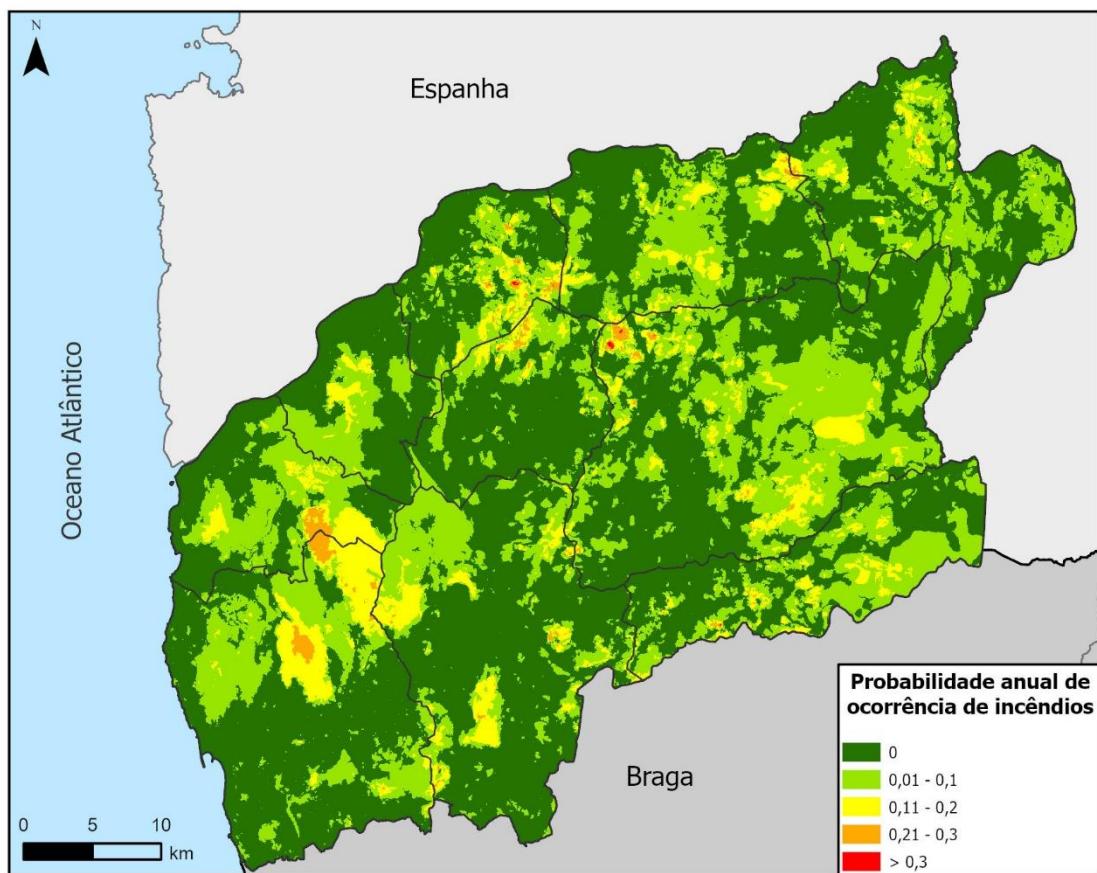


Figura 23. Probabilidade anual de ocorrência de incêndios rurais no Alto Minho.

Fonte: Territórios ardidos 2001 a 2023, Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas (<https://sig.icnf.pt/portal/home/item.html?id=983c4e6c4d5b4666b258a3ad5f3ea5af>).

3.6. Caracterização sociodemográfica

A Figura 24 representa a relação entre a densidade populacional e o número de ignições. A análise da figura revela uma concentração significativa de pontos numa faixa intermédia de densidade populacional (10,0 e 1000,0 de densidade populacional) e número de ignições, o que sugere a inexistência de uma correlação linear direta entre estas duas variáveis. Contudo, é possível identificar três agrupamentos distintos.

O retângulo verde, localizado no canto inferior esquerdo, abrange regiões com baixa densidade populacional (entre 1 e 10 hab./km²) e baixo número de ignições (abaixo de 200). As freguesias que se encaixam neste grupo são Gavieira, a união de freguesias de

Castro Laboreiro e Lamas de Mouro, a união de freguesias de Arga (Baixo, Cima e São João), Sistelo e Gave.

O retângulo laranja, situado na parte superior central do gráfico, evidencia regiões com densidade populacional moderada (entre 10 e 100 hab./km²) e elevado número de ignições (superior a 400). As freguesias que se encaixam neste grupo são Montaria, a união de freguesias de Gandra e Taião e Refoios do Lima Este agrupamento poderá refletir zonas de uso intensivo do solo, como áreas agrícolas ou de transição agrícola, onde as atividades humanas contribuem para a ocorrência de incêndios.

O retângulo azul, no canto superior direito, corresponde a regiões com elevada densidade populacional (superior a 1.000 hab./km²) e elevado número de ignições (>300). Só existe uma freguesia que se encaixa nesta secção, a união das freguesias de Viana do Castelo (Santa Maria Maior e Monserrate) e Meadela. É representado por grandes centros urbanos, onde a elevada concentração populacional, atividade industrial e pressão sobre os recursos naturais favorecem a ignição de focos de fogo.

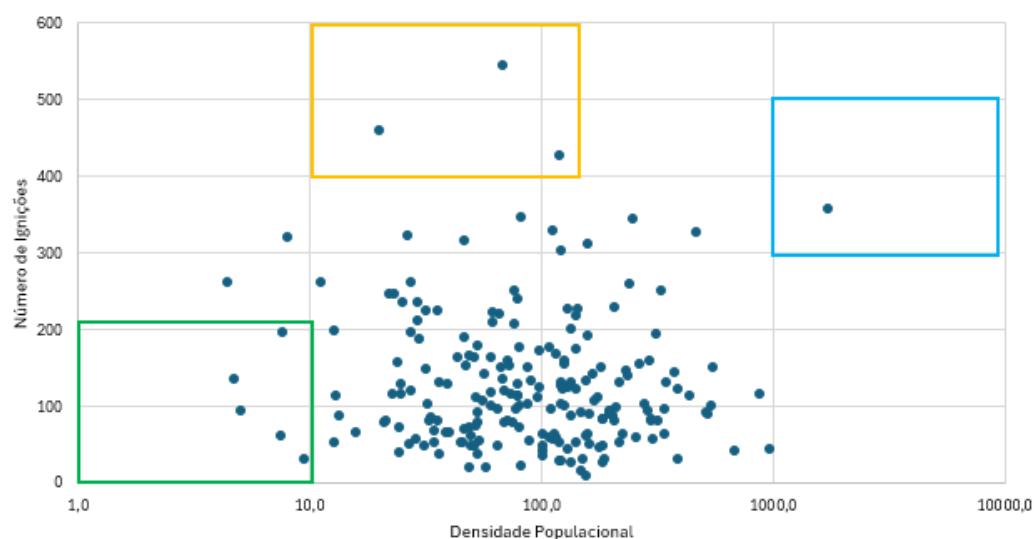


Figura 24. Gráfico de dispersão da densidade populacional e dos pontos de ignição.

Fonte: População residente 2021, Instituto Nacional de Estatística (https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_base_dados&contexto=bd&selTab=tab2).

De forma geral, tanto áreas com baixa densidade populacional como regiões densamente povoadas podem apresentar elevados níveis de ignições. Portanto, a variável da densidade populacional não é suficiente para explicar o número de ignições.

Na Figura 25 é apresentada a população residente por grupo etário para o ano de 2021. Viana do Castelo apresenta o maior quantitativo populacional, seguido por Ponte de Lima. Observa-se que, em todos os concelhos, a população jovem (0-19 anos) é inferior a 15000 residentes enquanto o grupo etário dos adultos (20-64 anos) é o grupo etário predominante, seguido pelo grupo dos idosos, que é o segundo grupo etário mais representativo. A população jovem tende a ter uma representatividade menor em comparação com as outras faixas etárias. Os concelhos de Melgaço, Paredes de Coura e Vila Nova de Cerveira destacam-se com uma população inferior a 2000 habitantes.

A Figura 26 ilustra o número de indivíduos empregados nos três setores de atividade nos municípios da sub-região do Alto Minho. Em todos os municípios, o setor terciário emerge como o setor predominante, destacando-se especialmente em Viana do Castelo, onde uma parte significativa da população está empregada neste setor. O setor secundário é o segundo setor com maior número de população empregada, sendo que os municípios de Viana do Castelo e Ponte de Lima apresentam um elevado número de pessoas empregadas neste setor. Por outro lado, o setor primário apresenta os valores mais baixos de população empregada em todos os concelhos. Em resumo, a análise evidencia o predomínio das atividades de comércio e serviços (setor terciário) como principal fonte de emprego, seguidas pelo setor industrial (secundário), enquanto o setor primário desempenha um papel mais modesto.

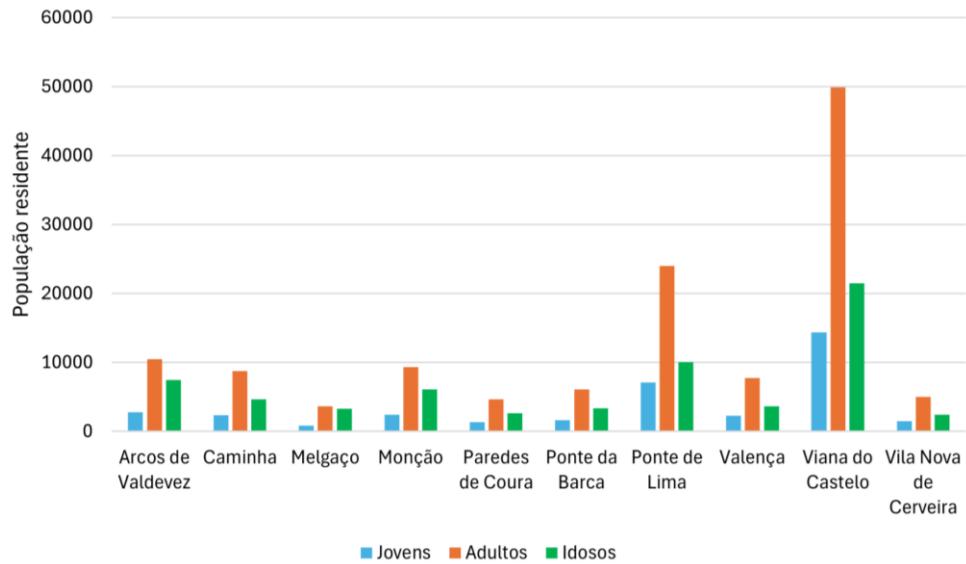


Figura 25. População por grupo etário por concelho.

Fonte: População residente por grupo etário 2021, Instituto Nacional de Estatística (https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_base_dados&contexto=bd&selTab=tab2).

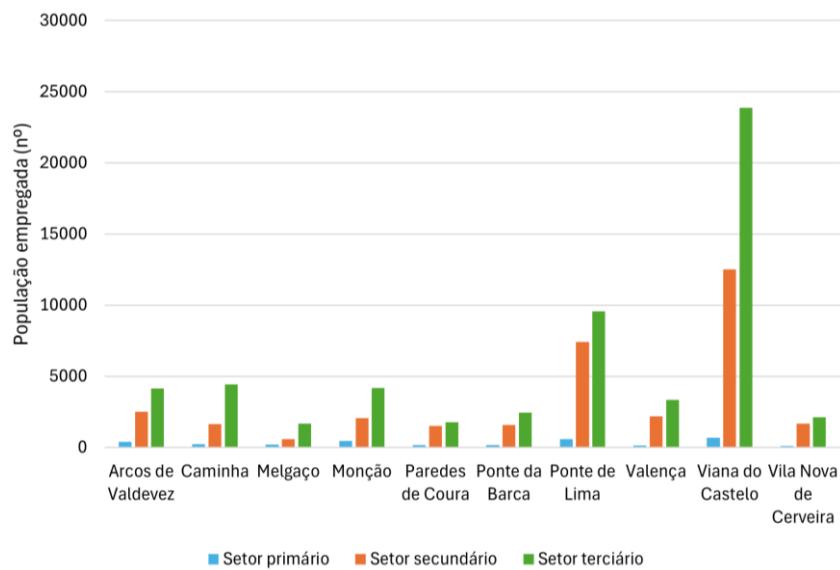


Figura 26. População empregada por setor de atividade.

Fonte: População empregada por setor de atividade 2021, Instituto Nacional de Estatística (https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_base_dados&contexto=bd&selTab=tab2).

4. Metodologia

A Figura 27 apresenta o esquema metodológico adotado neste estudo, que pode ser dividido em cinco etapas distintas:

1. Recolha de Informação matricial e vetorial e preparação dos mapas de base;
2. Criação das diferentes paisagens;
3. Simulação do comportamento básico do fogo para as diferentes paisagens;
4. Classificação dos outputs: altura das chamas e intensidade do fogo segundo a metodologia de Fernandes and Palheiro (2015);
5. Criação das matrizes e dos modelos de severidade potencial do fogo.

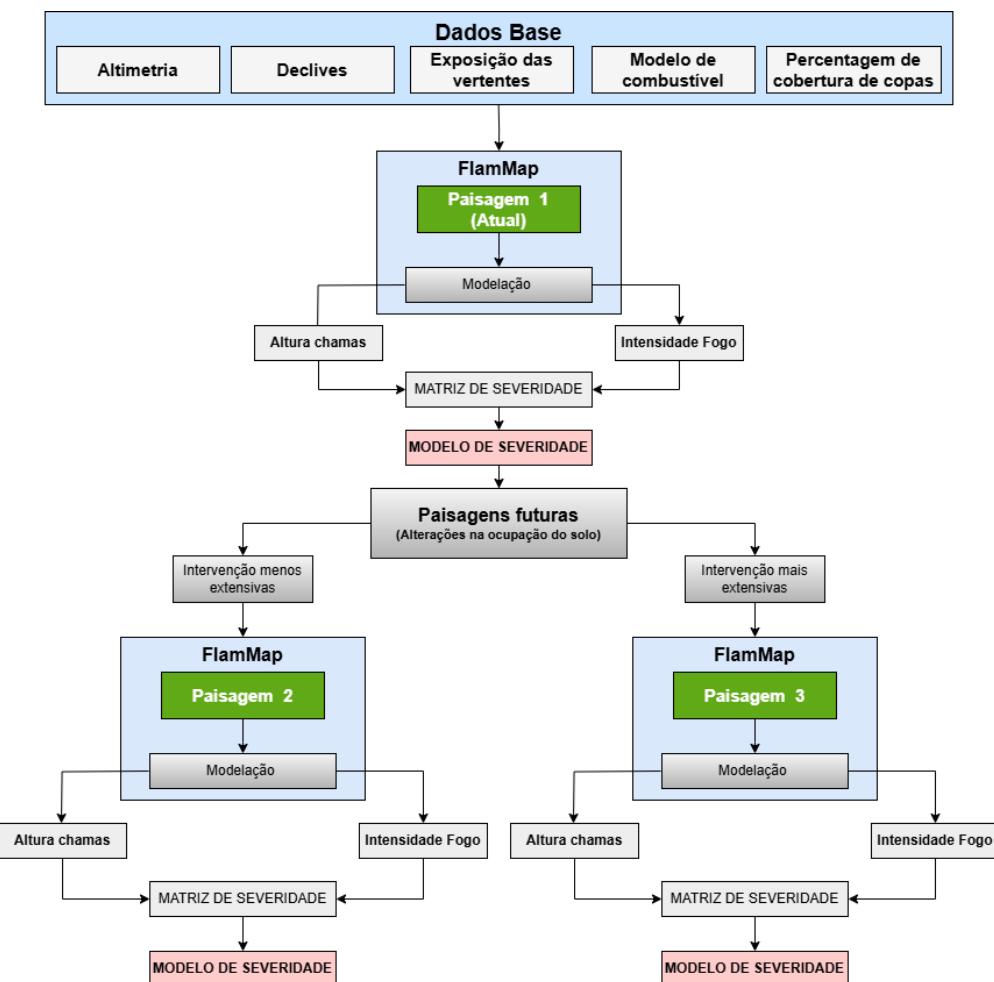


Figura 27. Esquema metodológico adotado.

4.1. Recolha de Informação matricial e vetorial e preparação dos mapas de base

A etapa inicial deste trabalho envolveu a elaboração de um projeto no software ArcGIS Pro, que desempenhou um papel fundamental na conversão de dados vetoriais para o modelo matricial com células de 100 x 100 metros e sistema de coordenadas ETRS89 PT-TM 06 Portugal. Os temas criados incluíram a altimetria, os declives, a exposição de vertentes, a percentagem de cobertura de copas e o modelo de combustível.

Na Tabela 1 estão listados os dados de base dos temas que compõem o ficheiro de paisagem (*landscape*) no FlamMap, bem como as informações referentes ao modelo de dados, fonte e sistema de coordenadas de origem.

Tabela 1. Características dos dados de base.

Dados	Modelo de dados	Fonte	Sistema de Coordenadas original
MDT	Raster 25 metros	Instituição: FCUP Nome do tema: SRTM-DEM Escala: Portugal Link: “ https://www.fc.up.pt/pessoas/jagoncal/dems/ ”	ETRS89_Portugal_TM06
Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS) 2018	Vetorial	Instituição: DGT Nome do tema: Carta de Ocupação do Solo Escala: Portugal Data de publicação: 2018 Link: “ https://geo2.dgterritorio.gov.pt/cos/COS2018/COS2018v2-shp.zip ”	ETRS89_Portugal_TM06
Percentagem de copas	Raster 100 metros	Instituição: Copernicus Nome do tema: Tree Cover Density 2018 Escala: Europa Data de publicação: 2018 Link: https://land.copernicus.eu/pan-european/high-resolution-layers/forests/tree-cover-density	ETRS_1989_LAEA

Faixas de gestão de combustíveis da Rede Primária	Vetorial	Instituição: ICNF Nome do tema: Rede primária de faixas de gestão de combustível Escala: Portugal Data de publicação: 2023 Link: https://sig.icnf.pt/portal/home/item.html?id=151ed5df1e9f4357bc4ecfde2be04e5f	ETRS89_Portugal_TM06
Modelos de combustível para Portugal	Raster 100 metros	Instituição: Fundação para a Ciência e a Tecnologia IP, Portugal. Nome do tema: Mapa de Modelos de Combustível Escala: Portugal Data de publicação: 2022 Link: https://github.com/anasa30/PT_FuelModels/tree/main/Documents	WGS_1984_UTM_Zone_29N

O FlamMap exige a criação de uma paisagem (*Landscape*), que consiste numa junção de 8 temas geoespaciais, sendo que 5 são obrigatórios e 3 são opcionais (Tabela 2).

Tabela 2. Temas utilizados na criação da *Landscape*.

Tema	Unidades Padrão	Obrigatoriedade
Altimetria	Metros	Obrigatório
Declives	Graus	Obrigatório
Exposição	Graus	Obrigatório
Modelo de Combustível	Número Farsite (entre 0-255)	Obrigatório
Cobertura de Copas	Percentagem	Obrigatório
Altura das Árvores	Metros	Opcional
Altura da Base da Copa	Metros	Opcional
Densidade de Copas	Kg/m ³	Opcional

Para a criação da paisagem no software FlamMap, os dados têm de estar no formato matricial ou ASCII. Além disto, é crucial que toda a informação cartográfica utilizada na criação destas camadas seja elaborada com o mesmo tamanho de célula (100 x 100 metros) e sistema de coordenadas (ETRS89_Portugal_TM06). Esta uniformidade assegura que todas as camadas se sobreponham corretamente, permitindo a sua integração na forma da paisagem simulada.

A altimetria foi calculada utilizando o raster do SRTM-DEM (*Shuttle Radar Topography Mission – Digital Elevation Model*) com resolução de 25 x 25 metros para Portugal Continental. Posteriormente, este tema matricial foi convertido para células de 100 x 100 metros e recortado para se ajustar à área de estudo. Utilizando este ficheiro como base foram calculados os declives e a exposição de vertentes, ambos em graus e não classificados.

A percentagem de cobertura de copas foi retirada do programa Copernicus com células de 100 x 100 metros, sendo posteriormente recortado pela área de trabalho. Uma vez que serão criadas paisagens com mudanças dos usos do solo, foi necessário criar novamente o tema da percentagem de cobertura de copas, recalculando-se uma nova percentagem de cobertura de copas com base na média de cobertura de cada uso do solo.

O FlamMap possui 13 modelos de combustível-padrão configurados, criados por Anderson (1982), mas permite a utilização de modelos de combustível personalizados (Finney, 2023). Uma vez que se utilizou um modelo de combustível customizado cujas características o *software* não reconhece, foi necessário criar um ficheiro anexo que descreve os parâmetros associados a cada modelo de combustível. Este ficheiro deve conter os dados em formato texto ASCII, delimitado por espaços e deve ser guardado com a extensão .FMD (Finney, 2023). Os números dos modelos devem estar entre 1 e 256 e não devem estar atribuídos a um modelo de combustível-padrão. No entanto, o software aconselha a limitar os números dos modelos personalizados ao intervalo de 14 a 89 para evitar conflitos com futuros modelos-padrão (Finney, 2023).

Neste trabalho, os números dos modelos de combustível variam entre 211 e 238, além de se utilizarem os modelos 4 e 11 da NFFL que não estão incluídos no ficheiro pois são considerados modelos-padrão do software. Nas áreas não incineráveis utiliza-se o modelo 98, de acordo com Sá *et al.* (2023). Os modelos para as áreas não incineráveis não precisam de constar no ficheiro .FMD, uma vez que são reconhecidos automaticamente pelo software. A Tabela 3 apresenta os valores característicos de cada modelo que devem estar incluídos no ficheiro .FMD.

Tabela 3. Dados para a construção do modelo de combustível customizado.

Campo	Nome	Tipo de dados	Unidades inglesas	Unidades métricas
Número FM	Número do modelo de combustível	Inteiro	Número 14-89	Número 14 -89
Código FM	Código do modelo de combustível	Texto	Definido pelo usuário até 7 caracteres	Definido pelo usuário até 7 caracteres
1H, 10H, 100H, LiveH(erbaceous), LiveW(woody)	Carregamento de combustível	Decimal	Toneladas/Acre	Toneladas Métricas/hectare
Tipo FM	Tipo de modelo de combustível	Texto	"static" or "dynamic"	"static" or "dynamic"
1HSAV, HSAV ao vivo, WSAV ao vivo	Razão entre superfície e volume	Inteiro	1/pé	1/cm
Profundidade	Profundidade do leito de combustível	Decimal	Pés	Cm
XtMoist	Humidade de extinção	Inteiro	%	%
Dht, Lht	Conteúdo de calor combustíveis vivos e mortos	Inteiro	BTU/libra	Quilograma/kg

O ficheiro .FMD criado foi adaptado do Projeto Fire Engine (Figura 28), que mostra a tabela com os valores de referência para cada modelo. Estes valores foram retirados do estudo de Fernandes and Loureiro (2022), no qual o modelo 238 corresponde ao modelo RESE-01 do conjunto de modelos de combustível florestal para a Região Centro de Portugal criado por Cruz (2005) (Figura 29). A Figura 30 apresenta o ficheiro .FMD criado para inserir no software FlamMap.

Modelo	Espess. (m)	Carga (t ha ⁻¹)				SVR (m ⁻¹)			PC (kJ kg ⁻¹)	Hx (%)
		1hr	10hr	100hr	arb.	herb.	1hr	herb.		
F-RAC	0.05	3.75	2.00	1.00	1.18	0.00	6500	-	4500	20500
F-FOL	0.15	2.67	1.27	0.69	1.16	0.00	4500	-	5000	20500
F-PIN	0.10	6.50	1.50	0.00	0.00	0.00	5500	-	-	20500
F-EUC	0.32	4.63	2.96	1.27	1.12	0.00	4200	-	5000	21000
M-CAD	0.63	4.54	1.87	0.61	9.08	0.00	6000	-	5000	20000
M-ESC	0.50	5.65	1.50	0.48	7.89	0.00	5000	-	5500	20500
M-PIN	0.50	7.21	3.00	0.00	6.89	0.00	5500	-	6000	21000
M-EUC	0.64	8.37	3.81	0.00	4.51	0.00	4700	-	5000	21000
M-EUCd	0.40	1.37	2.89	1.59	1.84	0.00	4500	-	5000	21000
M-H	0.10	2.71	1.00	0.00	0.10	0.66	5500	8000	4500	20500
M-F	0.30	4.50	1.50	0.50	0.48	2.35	6000	8000	4500	19500
V-MAb	0.50	6.00	0.50	0.00	7.50	0.00	4500	-	4500	21000
V-MAa	1.05	9.50	2.50	0.00	14.50	0.00	3500	-	4000	21000
V-MMb	0.90	4.00	0.50	0.00	7.00	0.00	3000	-	3000	20500
V-MMa	1.70	6.00	4.00	0.00	13.00	0.00	2500	-	3000	20500
V-MH	0.55	1.00	1.00	0.00	5.50	1.50	4500	8500	4000	19500
V-Hb	0.35	0.30	0.00	0.00	0.00	1.20	6000	6000	-	19000
V-Ha	0.60	0.65	0.15	0.00	0.40	2.35	4000	5500	4000	19000

SVR – relação entre superfície e volume. PC – conteúdo calorífico. Hx – humidade de extinção do combustível 1hr.

Figura 28. Características dos modelos de combustível florestal para Portugal retirado de Fernandes and Loureiro (2022).

Modelo	Carga (kg/m ²)				Relação S/V (cm ² /cm ³)		Profundidade (m)		Poder calorífico (kJ/kg)	Humidade extinção (%)
	Combustíveis mortos			Arbustivos vivos						
	1-hr.	10-hr.	100-hr.	(0<6 mm)	1-hr.	Arbustivos	Real	Ajuste *		
HER-01	0.3	0	0	0	80	-	0.35	0.35	18000	30
MAT-01	0.2	0	0	0.7	60	60	0.4	0.4	22500	40
MAT-02	0.4	0	0	1.0	60	60	1.0	1.0	22700	40
MAT-03	0.7	0	0	1.4	60	60	1.4	1.4	22700	40
PPIN-02	0.6	0.5	0.2	0	60	-	0.15	0.35 *	21000	50
PPIN-03	0.6	0.3	0.1	0	60	60	0.06	0.3 *	21000	50
PPIN-04	0.7	0.3	0.2	0.6	60	60	0.7	0.7	22000	50
PPIN-05	0.4	0.2	0.1	0.1	60	60	0.04	0.1 *	21000	40
EUC-01	0.4	0	0	0	55	-	0.04	0.04	20000	25
EUC-02	0.6	0.3	0.1	0	55	-	0.08	0.2 *	20000	25
EUC-03	0.7	0.4	0.4	0.6	55	60	0.6	0.6	22000	40
EUC-04	0.8	0.3	0.6	0	55	-	0.2	0.25 *	20000	40
FOLC-01	0.3	0.3	0.2	0	79	-	0.06	0.06	18500	21
RESE-01	0.7	0.7	0.5	0	55	-	0.3	0.3	22000	30

Figura 29. Características dos modelos de combustível florestal para a Região Centro de Portugal, retirado de Cruz (2005).

METRIC																			
211	FM211	4.63	2.96	1.27	0.00	1.120	static	42000	00000	50000	32.00	26	21000.00	21000.00					
212	FM212	2.67	1.27	0.69	0.00	1.160	static	45000	00000	50000	15.00	25	20500.00	20500.00					
221	FM221	4.54	1.87	0.61	0.00	9.080	static	60000	00000	50000	63.00	30	20000.00	20000.00					
223	M-EUC	8.37	3.81	0.00	0.00	4.510	static	47000	00000	50000	64.00	32	21000.00	21000.00					
224	FM224	1.37	2.89	1.59	0,00	1,840	static	45000	00000	50000	40.00	26	21000.00	21000.00					
225	FM225	4.50	1.50	0.50	2.35	0.480	static	60000	80000	45000	30.00	35	19500.00	19500.00					
227	FM227	7.21	3.00	0.00	0.00	6.890	static	55000	00000	60000	50.00	40	21000.00	21000.00					
231	FM231	0.65	0.15	0.00	2.35	0.400	static	40000	55000	40000	60.00	24	19000.00	19000.00					
232	FM232	0.30	0.00	0.00	1.20	0.000	static	60000	60000	00000	35.00	24	19000.00	19000.00					
233	FM233	9.50	2.50	0.00	0.00	14.50	static	35000	00000	40000	105.00	35	21000.00	21000.00					
234	V-Mab	6.00	0.50	0.00	0.00	7.500	static	45000	00000	45000	50.00	35	21000.00	21000.00					
235	FM235	1.00	1.00	0.00	1.50	5.500	static	45000	85000	40000	55.00	25	19500.00	19500.00					
237	V-MMb	4.00	0.50	0.00	0.00	7.000	static	30000	00000	30000	90.00	20	20500.00	20500.00					
238	FM238	7.00	7.00	5.00	0.00	0.000	static	55000	00000	60000	30.00	30	22000.00	22000.00					

Figura 30. Modelo de combustível customizado.

Além do ficheiro .FMD, é necessária a criação um ficheiro anexo com os valores de humidade inicial do combustível. Este é um arquivo de texto ASCII separado por espaços, que deve ser guardado com extensão .FMS (Finney, 2023). A humidade dos combustíveis é expressa em percentagem de números inteiros e podem exceder os 100%. A Tabela 4 apresenta os dados que se devem utilizar na construção deste ficheiro.

Tabela 4. Dados para a construção do ficheiro de humidade inicial do combustível adaptado de Finney (2023).

Dados	Nome	Tipo de dados	Unidades
FuelMod	Modelo de combustível	Número inteiro	Número entre 1-256
1H	Humidade do combustível a 1 hora	Número inteiro	Percentagem
10H	Humidade do combustível a 10 horas	Número inteiro	Percentagem
100H	Humidade do combustível a 100 horas	Número inteiro	Percentagem
LiveH(erbaceous),	Combustíveis herbáceos vivos	Número inteiro	Percentagem
LiveW(ood)	Combustíveis lenhosos vivos	Número inteiro	Percentagem

O ficheiro foi criado usando os dados presentes em Oliveira (2016). Os autores adotam os valores de 6% para 1H, 7% para 10h e 8% para 100h, adotando para os restantes campos o valor de 85%. Na Figura 31 está representado o resultado do ficheiro .FMS.

211	6	7	8	85	85
212	6	7	8	85	85
221	6	7	8	85	85
223	6	7	8	85	85
224	6	7	8	85	85
225	6	7	8	85	85
227	6	7	8	85	85
231	6	7	8	85	85
232	6	7	8	85	85
233	6	7	8	85	85
234	6	7	8	85	85
235	6	7	8	85	85
237	6	7	8	85	85
238	6	7	8	85	85

Figura 31. Modelo de humidade dos combustíveis customizado.

Finalmente, as faixas de gestão de combustíveis da Rede Primária foram convertidas num modelo matricial, sendo depois integradas no modelo de combustível, resultando na criação de um modelo de combustível unificado. As áreas ocupadas pelas faixas de gestão no modelo de combustível foram classificadas como modelo de combustível 232, o modelo de menor carga de combustível, uma vez que estas áreas são geralmente cobertas por vegetação rasteira.

4.2. Construção das Paisagens Atual e Futuras

A segunda etapa do trabalho consistiu na criação das diferentes paisagens no FlamMap: a Paisagem 1 (atual) e as paisagens futuras, com intervenções mais ou menos extensivas (Paisagens 2 e 3). As paisagens futuras serão elaboradas tendo por base propostas de alteração do uso do solo tendo em conta áreas de severidade máxima, correspondendo

às classes de severidade 8 e 9 (Paisagem 2) e áreas de severidade relativamente intensa, abrangendo as classes de severidade de 6 a 9 (Paisagem 3), de modo a diminuir a severidade potencial do fogo. As paisagens modeladas apresentam distintos níveis de intervenção. A Paisagem 2 evidencia modificações exclusivamente nas áreas classificadas com severidade extrema, correspondentes às classes de severidade mais elevada. Por sua vez, a Paisagem 3, mais conservadora, incorpora alterações em metade das classes de severidade, abrangendo as quatro classes de severidade mais elevadas entre o total de oito.

Após reunir os inputs, iniciou-se o trabalho no software FlamMap, onde foi necessário criar as paisagens (*Landscape*) onde estão incorporados todos os temas (altitude, declives, exposição de vertentes, percentagem de cobertura de copas e o modelo de combustível) e definido o sistema de coordenadas (ETRS89 - Portugal - TM06) e o tamanho da célula (100 x 100 metros). Uma vez criada e gravada (*Landscape File Generation*), a paisagem é exibida no layout principal do software, permitindo a visualização conforme os temas inseridos como dados de entrada. O tema principal apresentado pelo software é o modelo de combustível (Figura 32). Este processo foi repetido para a paisagem atual e para as duas paisagens futuras.

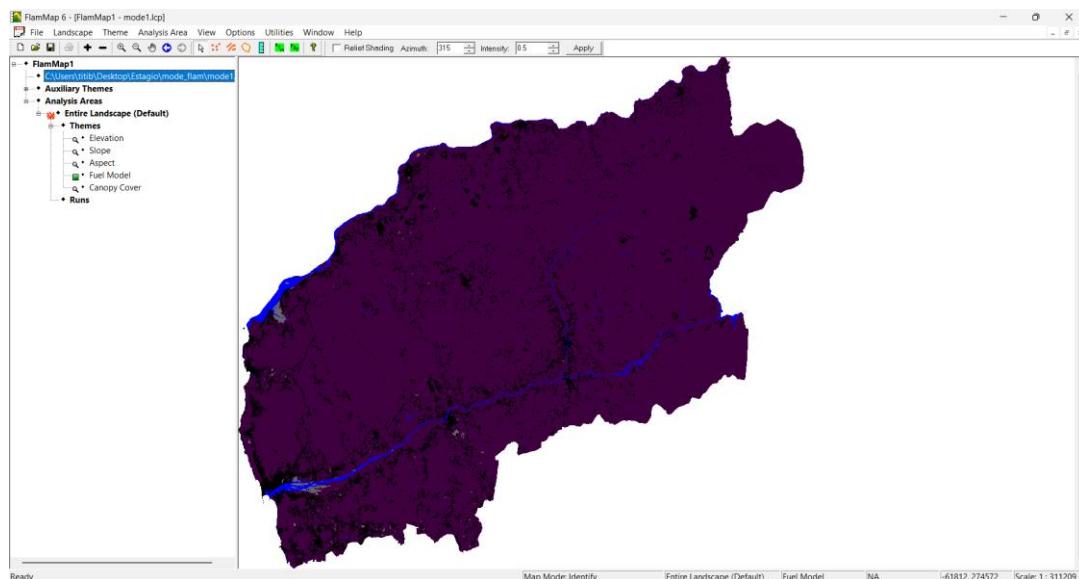


Figura 32. Vista da camada dos modelos de combustível no layout do FlamMap.

A primeira paisagem representa a situação atual da área de estudo. Após a realização da simulação para esta configuração e a construção da respetiva matriz de severidade, foi elaborado o modelo de severidade do fogo, o qual permitiu identificar as zonas com maior propensão para comportamentos de severidade extrema do fogo.

Com base nos resultados obtidos para a Paisagem atual, foram concebidas duas paisagens idealizadas com o objetivo de reduzir a severidade dos incêndios. Na Paisagem 2, foram intervencionadas as áreas classificadas com severidade de nível 8 e 9, correspondentes a zonas de severidade extrema. Já na Paisagem 3, as alterações incidiram sobre as áreas com severidade de nível 6 a 9 correspondendo às quatro classes de severidade mais elevada.

Com o intuito de mitigar a severidade do fogo, foram selecionados usos do solo com menor carga de combustível do que os existentes. Substituíram-se, assim, áreas de matos por áreas de pastagens espontâneas, florestas de pinheiro-bravo por vinhas, florestas de eucalipto por pastagens melhoradas e, por fim, florestas de espécies invasoras por florestas de outros carvalhos. Estas alterações foram planeadas de forma a preservar as atividades económicas locais, minimizando os impactos negativos na economia da sub-região, bem como promover outras atividades características da sub-região como a produção agropastoril, que se iria apoiar nas pastagens, bem como a produção de vinho verde, um produto típico da sub-região.

4.3. Simulação do comportamento básico do fogo para as diferentes paisagens

A terceira etapa do trabalho focou-se na simulação de parâmetros do comportamento básico do fogo no FlamMap, utilizando temas previamente criados e uniformizados na etapa anterior. O comportamento básico do fogo corresponde a *outputs* gerados pela simulação do fogo em toda a paisagem, na qual todas as células queimam, sem que sejam definidos pontos de ignição ou a duração dos incêndios.

No software foram selecionados os seguintes parâmetros do comportamento básico do fogo: intensidade da linha de fogo (*Fireline Intensity*) em kW/m na direção de máxima propagação e o comprimento das chamas (*Flame Length*) em metros.

Após a criação das paisagens, nas quais estão incorporados os cinco temas obrigatórios, realizámos as simulações (*run*) utilizando o *FlamMap/MTT (Minimum Travel Time)* e o *TOM (Treatment Optimization Model)*. Para esta simulação, utilizámos duas janelas de dados de entrada. Na janela de dados gerais (*Inputs*), definimos um modelo de combustível personalizado, inserindo o arquivo construído (arquivo .fmd). Também nesta janela, inserimos o arquivo de humidade dos combustíveis (arquivo .fms) e definimos a velocidade e a direção do vento, além do método de cálculo do fogo de copas. Este último foi apenas uma formalidade, já que, na ausência dos temas opcionais de copas, o fogo de copas não foi simulado.

Os dados de direção e velocidade do vento foram obtidos do site freemeteo.com.pt para o dia 16 de setembro de 2024. Este dia foi escolhido devido à existência de um grande número de incêndios ativos e das condições climáticas presentes. Os dados foram retirados da estação Vigo Peinador, indicando uma velocidade do vento de 20 km/h e uma direção sul, equivalente a 180°.

Quanto às características das copas, definimos a humidade das folhas em 100%, conforme o valor padrão para uma época de incêndios acima da média (Finney, 2023). Na segunda janela *Fire Behavior Options* (comportamento básico do fogo) foram selecionados os seguintes parâmetros: intensidade da linha de fogo (*Fireline Intensity*) em kW/m na direção de máxima propagação e comprimento das chamas (*Flame Length*) em metros (Figura 33).

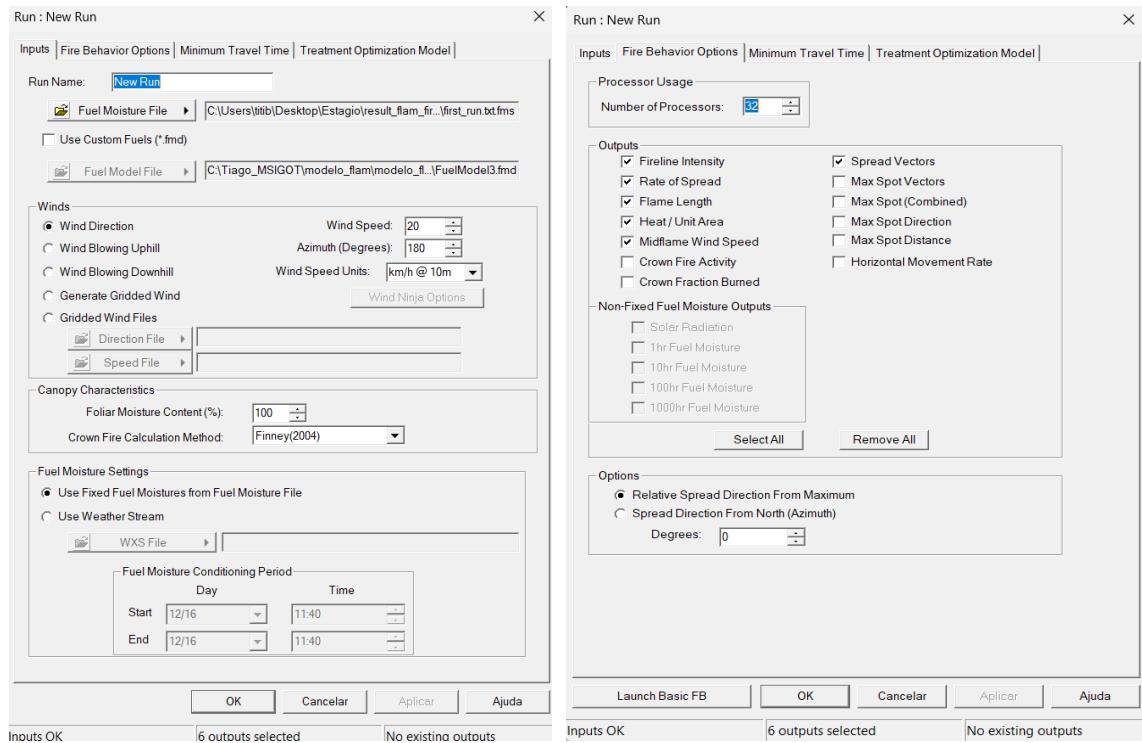


Figura 33. Seleção de dados de entrada e outputs no FlamMap.

4.4. Classificação dos outputs

A quarta parte desta metodologia consistiu na classificação dos *outputs* do FlamMap, seguindo a classificação proposta no estudo de Fernandes and Palheiro (2015), que propõe uma classificação para o comprimento das chamas e outra para a intensidade da linha de fogo. Neste estudo os autores classificam a intensidade do fogo em 5 classes. Como podemos ver na Figura 34, estas dividem-se em 5 categorias, sendo elas: reduzido (0-499), moderado (500-1 999), elevado (2 000-3 999), muito elevado (4 000-9 999) e extremo ($\geq 10\,000$). Para o comprimento das chamas, os autores propõem quatro classes diferentes, sendo elas reduzido, moderado, elevado e muito elevado. Depois de reclassificados, os modelos foram combinados incluindo todas as combinações possíveis entre as classes dos dois modelos.

Classe	Intervalo de FWI	Intensidade (kW/m) Comprimento da chama (m)	Descrição e dificuldade de controlo por ataque directo
I. Reduzido	0 – 9,4	0 - 499 0 - 1,3	Fogo de superfície, controlável com material de sapador em toda a extensão do seu perímetro.
II. Moderado	9,5 – 18,2	500 – 1 999 1,4 – 2,5	Fogo vigoroso de superfície. Os meios terrestres são efectivos em toda a extensão do perímetro do incêndio.
III. Elevado	18,3 – 25,2	2 000 – 3 999 2,6 – 3,5	Fogo de superfície de elevada intensidade, com períodos de fogo de copas. O sucesso do ataque à cabeça do fogo exigirá provavelmente meios aéreos.
IV. Muito Elevado	25,3 – 38,9	4 000 – 9 999 ≥ 3,6	Fogo passivo de copas. O ataque à cabeça do fogo é possível apenas com meios aéreos pesados, mas o seu sucesso não é garantido. Considerações de segurança e efectividade aconselham que os esforços de controlo com meios terrestres incidam apenas nos flancos e retaguarda do fogo.
V. Extremo	≥ 39,0	≥ 10 000	São expectáveis fogos de copas activos. A velocidade de propagação, o potencial de focos secundários, e a probabilidade do fogo transportar obstáculos são extremos. O ataque à cabeça do fogo não é possível. A acção dos meios terrestres deve-se limitar à retaguarda e flancos do fogo. O ataque indirecto usando o fogo pode ser efectivo.

Figura 34. Classes das da intensidade do fogo e do comprimento da chama retirado de (Fernandes & Palheiro, 2015).

4.5. Criação das matrizes e dos modelos de severidade potencial do fogo

Após a realização das simulações no software FlamMap, os resultados foram classificados e analisados com base nas duas variáveis simuladas: comprimento das chamas e intensidade da linha de fogo. Para as integrar, recorreu-se a uma matriz de severidade potencial do fogo, representada na Figura 35, que permite avaliar o comportamento potencial do incêndio com base na combinação dos dois fatores mencionados.

Esta matriz tem como objetivo estimar o grau de severidade do fogo, refletindo o nível de danos potenciais em função da sua magnitude, intensidade, extensão, velocidade de propagação ou outro parâmetro que melhor expresse o seu poder destrutivo, tanto para

as equipas de combate como para o ambiente envolvente. A intensidade da linha de fogo é classificada em classes cinco classes sendo elas reduzida, moderada, elevada, muito elevada e extrema. O comprimento das chamas é classificado em 4 classes reduzido, moderado, elevado, muito elevado.

O cruzamento destas categorias na matriz resulta num índice numérico de severidade, que varia entre 2 e 9. Valores mais baixos (2 a 4) indicam menor severidade, sugerindo uma maior probabilidade de controlo direto do fogo. Em contraste, valores mais elevados (7 a 9) correspondem a comportamentos extremos do fogo, associados a riscos acrescidos para a segurança das operações e à necessidade de adoção de estratégias de combate indiretas, mais seguras e eficazes em contextos de elevada intensidade.

		Comprimento da chama			
		Reduzido	Moderado	Elevado	Muito elevado
Intensidade da linha de fogo	Reduzida	2	3	4	5
	Moderada	3	4	5	6
	Elevada	4	5	6	7
	Muito elevada	5	6	7	8
	Extrema	6	7	8	9

Figura 35. Matriz de severidade potencial do fogo.

5. Resultados

5.1. Modelo de severidade dos incêndios rurais na paisagem atual

A severidade foi classificada em níveis de 2 a 9, posteriormente agregados em categorias descritivas para facilitar a sua interpretação: severidade baixa (níveis 2 e 3), severidade moderada (nível 4), severidade elevada (nível 5), severidade muito elevada (níveis 6 e 7) e severidade extrema (níveis 8 e 9) (Figura 36). Verifica-se um predomínio das classes 2 e 6, correspondentes, respetivamente, a severidade baixa e severidade muito elevada, cada uma ocupando cerca de 32% da área total (Figura 37). A severidade extrema (classe 9) representa ainda 22,6% do território, o que evidencia a presença de áreas críticas e altamente suscetíveis (Figura 37). As restantes classes apresentam expressão territorial reduzida, reforçando a polarização entre zonas resilientes e zonas sujeitas a impactos severos.

O relevo constitui um dos principais fatores explicativos desta distribuição. Mais de 30% do território apresenta declives superiores a 15°, com 14% da área em encostas muito inclinadas (superiores a 20°). Estas zonas coincidem espacialmente com os níveis mais elevados de severidade, sobretudo no interior e nordeste da região, onde o relevo acidentado dificulta o acesso, o que favorece a propagação de fenómenos disruptivos, como os incêndios, e compromete a eficácia das ações de supressão.

A altitude assume também um papel determinante. As áreas situadas acima dos 700 metros representam cerca de 15% do território e localizam-se maioritariamente no nordeste da sub-região e coincidem, em grande parte, com as classes 8 e 9 de severidade. Estas zonas, caracterizadas por vegetação densa, baixa densidade populacional e difícil acessibilidade, apresentam maior acumulação de biomassa e menor intervenção humana, o que favorece condições propícias a eventos de elevada severidade. Em contraste, as altitudes mais reduzidas, até 200 metros, concentram-se nas zonas litorais e ribeirinhas, coincidindo com os níveis mais baixos de severidade, devido à maior fragmentação da paisagem e à presença de áreas agrícolas e urbanas.

A exposição solar das vertentes também influencia o comportamento da severidade. As vertentes voltadas a sul, sudoeste e sudeste, que no seu conjunto representam cerca de

39% da área, estão expostas a uma maior radiação solar, o que promove maior evapotranspiração e, consequentemente, uma maior secura dos combustíveis vegetais. Estas condições agravam o risco e intensificam os efeitos dos eventos, associando-se fortemente às áreas com severidade muito elevada ou extrema. Por oposição, as vertentes orientadas a norte e noroeste, com menor exposição solar e maior humidade relativa, tendem a coincidir com áreas de severidade mais baixa.

A estrutura do coberto vegetal, em particular a cobertura de copas, revela uma influência clara sobre a severidade. Cerca de 90% da área apresenta algum grau de cobertura arbórea, sendo que 47,5% possui densidade de copas superior a 80%. Esta elevada continuidade vertical e horizontal dos combustíveis florestais favorece a propagação de incêndios de copas, mais intensos e de difícil controlo, sobretudo em combinação com declives acentuados e forte exposição solar. Estas condições estão associadas, em grande medida, às zonas de severidade mais elevada, em especial nas áreas de serra no interior da sub-região.

Em síntese, a distribuição da severidade na Paisagem 1 é fortemente condicionada pela interação entre altitude, declive, exposição solar e densidade da vegetação. As áreas mais afetadas situam-se predominantemente em regiões interiores, com relevo acidentado, vegetação densa e exposição solar intensa. Esta análise evidencia a importância de considerar os fatores biofísicos na gestão do território e na definição de estratégias de prevenção e mitigação de riscos, nomeadamente através da gestão ativa da vegetação, do ordenamento do espaço florestal e da criação de acessos estratégicos em áreas críticas.

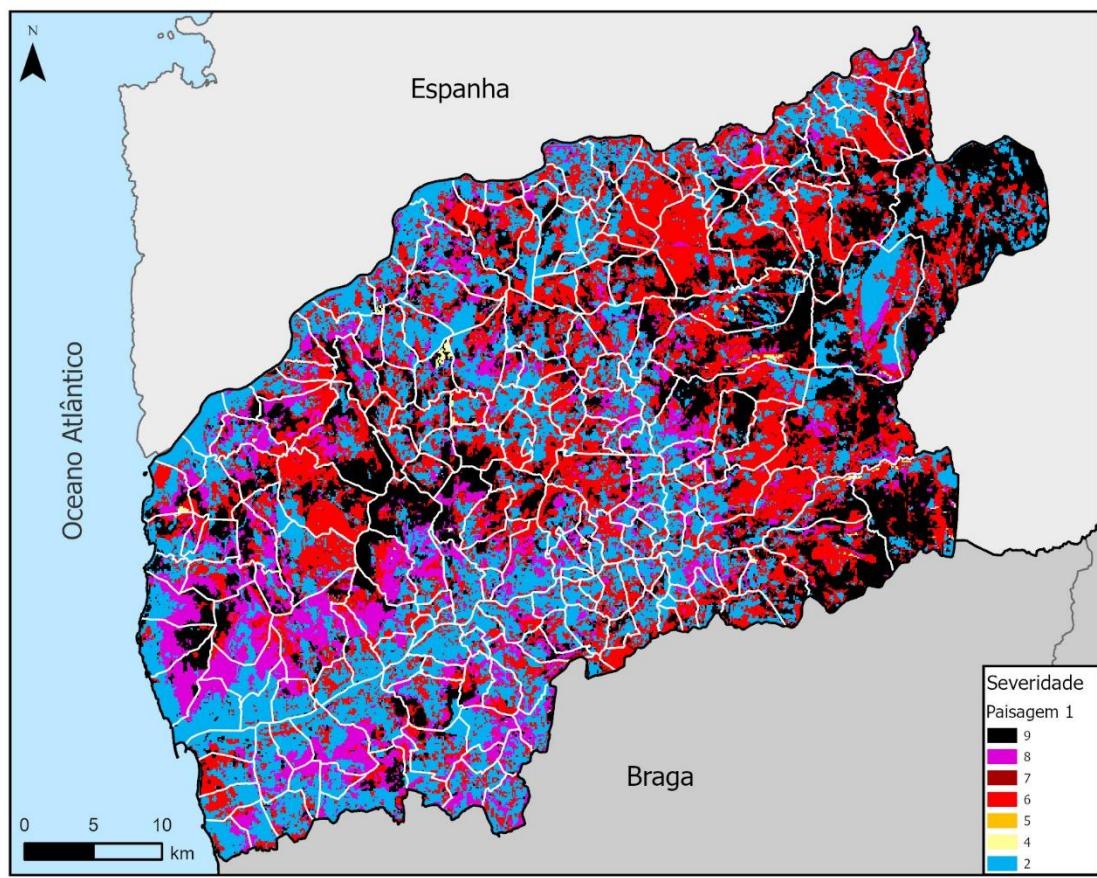


Figura 36. Modelo de severidade potencial do fogo para a paisagem 1. .

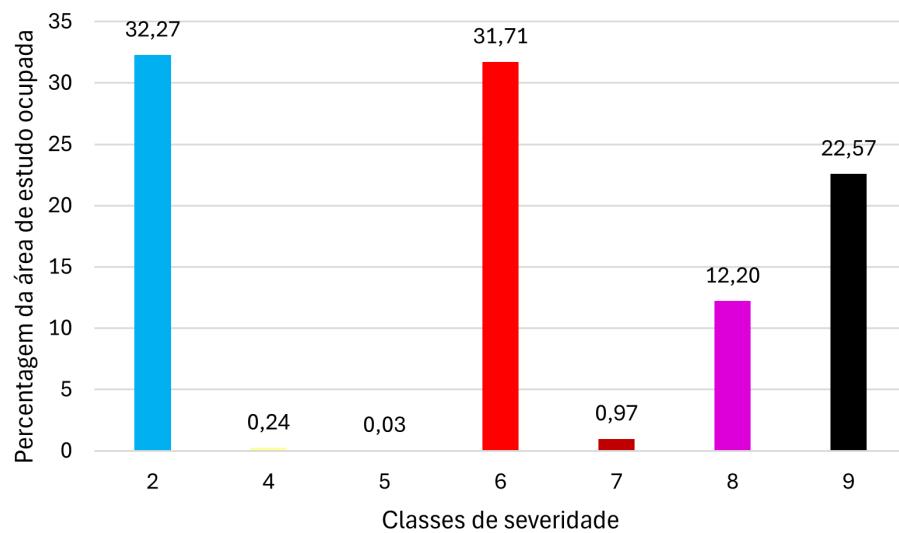


Figura 37. Percentagem do território ocupado por cada classe de severidade da paisagem 1.

5.2. Severidade dos incêndios rurais em cenários de paisagem futura

Nas Paisagens 2 e 3, procedeu-se à substituição de áreas de matos por pastagens espontâneas, considerando que os solos subjacentes são presumivelmente mais pobres. Além disso, tratando-se de áreas extensas, optou-se por um uso do solo menos exigente em termos de manutenção e investimento.

As florestas de pinheiro-bravo foram convertidas em vinhas, dado que estas ocupam uma área menos extensa, mas requerem um maior nível de manutenção e investimento. Este uso do solo é, portanto, mais intensivo e economicamente exigente.

As florestas de eucalipto foram substituídas por pastagens melhoradas, uma vez que estas áreas apresentam uma extensão intermédia superior à das florestas de pinheiro-bravo, mas inferior à dos matos e exigem menor intervenção e investimento.

Com o objetivo de reduzir a presença de espécies invasoras e promover a expansão da floresta autóctone portuguesa, substituíram-se florestas compostas por espécies invasoras, predominantemente acárias e outras espécies com elevada carga de combustível, por florestas de carvalhos autóctones. Estas últimas são constituídas maioritariamente por espécies de carvalhos nativas de Portugal e apresentam uma menor carga combustível, contribuindo assim para uma gestão florestal mais sustentável e resiliente ao fogo.

De acordo com a proposta de Sá *et al.* (2023), foram atribuídos os seguintes modelos de combustível aos diferentes usos do solo:

- Pastagens melhoradas - modelo de combustível 231;
- Pastagens espontâneas – modelo de combustível 232;
- Vinhas - modelo de combustível 235;
- Florestas de carvalhos autóctones – modelo de combustível 221.

Analizando a Figura 38, que corresponde ao modelo de severidade da Paisagem 2 e a Figura 39, que apresenta a percentagem de área ocupada por cada classe de severidade na sub-região, é possível observar que a maioria da área de estudo se encontra classificada em classes de severidade baixa, destacando-se a classe 2, que ocupa

aproximadamente 53,1% do território. No entanto, persistem áreas relevantes com severidade elevada, nomeadamente a classe 6 (30,6%). Em menor proporção, as classes 8 (4,7%) e 9 (10,5%), correspondem a áreas de severidade extrema, que estão associadas a elevada carga de combustível e à elevada dificuldade de combate ao fogo associada à morfologia do terreno.

Estes valores estão diretamente ligados à estratégia de intervenção adotada para a Paisagem 2, que incide exclusivamente sobre as áreas classificadas com severidade extrema (classes 8 e 9) da paisagem 1 (Paisagem atual). Nestes núcleos críticos, foram planeadas alterações do uso do solo, substituindo usos do solo com elevada carga de combustível como matos, florestas de pinheiro-bravo, floresta de eucalipto e florestas de espécies invasoras por ocupações com menor carga de combustível.

Assim, a Paisagem 2 configura-se como uma solução intermédia e menos extensa, que procura atenuar os comportamentos de fogos mais severos sem recorrer a uma transformação generalizada do território.

A distribuição percentual das classes de severidade, conforme ilustrado na Figura 39 confirma o impacto positivo desta intervenção dirigida. Verifica-se uma redução nas áreas de severidade extrema (classes 8 e 9), que passam a representar 15,2% da ocupação do território, evidenciando o potencial da abordagem. Contudo, este valor indica também margem para estratégias mais abrangentes, como na Paisagem 3, que incluirá intervenções em áreas de severidade média-alta (classes 6 a 9), visando uma mitigação mais eficaz da severidade do fogo.

Em síntese, a Paisagem 2 constitui uma proposta de gestão florestal seletiva, orientada para a segurança e sustentabilidade das zonas mais suscetíveis a incêndios rurais, conciliando a redução da severidade dos incêndios com a preservação do tecido económico e social da região. Este cenário serve como referência comparativa para futuras análises, nomeadamente com modelos mais conservadores e de maior impacto na mitigação da severidade.

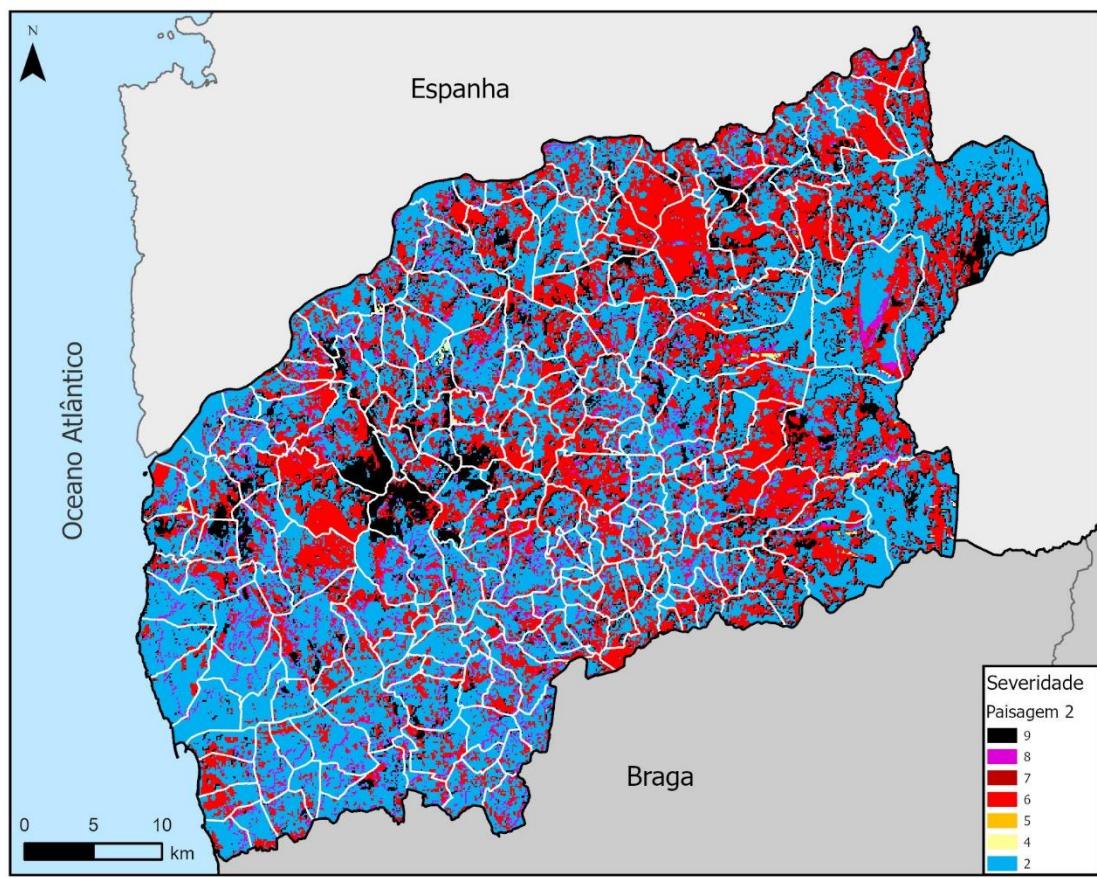


Figura 38. Modelo de severidade potencial do fogo para a paisagem 2.

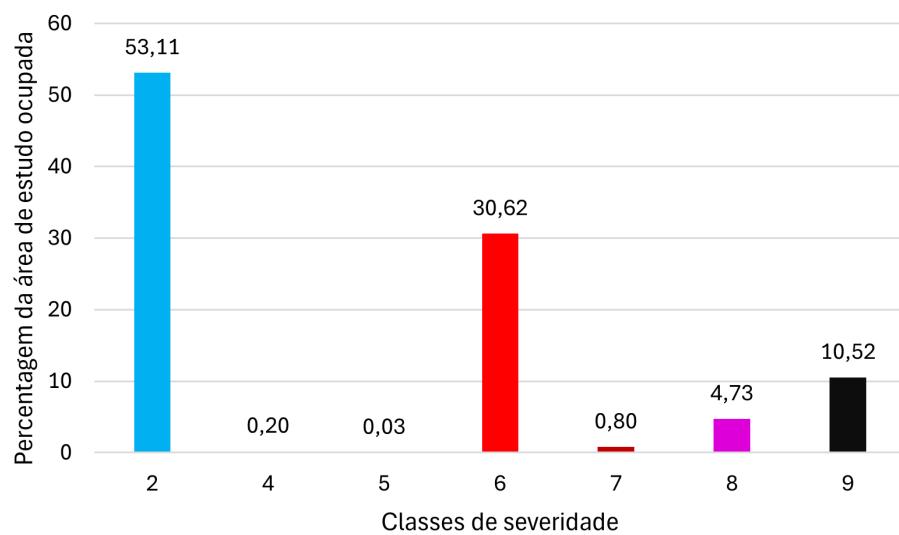


Figura 39. Percentagem do território ocupado por cada classe de severidade da paisagem 2.

A Paisagem 3 (Figura 40) representa o cenário mais extensivo de intervenção delineado para a área de estudo. Este cenário alarga o âmbito das intervenções, abrangendo não apenas as zonas classificadas com severidade extrema, mas também todas as áreas incluídas nas classes de severidade entre 6 e 9. O objetivo central consiste na obtenção de uma redução mais expressiva e territorialmente abrangente da severidade potencial do fogo, através de uma abordagem preventiva sobre uma superfície mais vasta.

A Figura 40 ilustra a configuração espacial da Paisagem 3, enquanto a Figura 41 apresenta a distribuição percentual da ocupação do solo por classe de severidade. Os dados evidenciam uma predominância de áreas de baixa severidade (classe 2), que ocupam aproximadamente 66% do território. As áreas de severidade moderada, nomeadamente a classe 6, mantêm alguma representatividade (cerca de 21,8%), embora com distribuição mais dispersa e menor densidade. As zonas de severidade muito elevada (classes 7, 8 e 9) registam uma redução significativa, representando conjuntamente cerca de 11,6% da área total, sendo a classe 9 responsável por 8,2%. As classes 4 e 5 mantêm-se praticamente residuais em termos de ocupação territorial.

Estes resultados decorrem da aplicação de uma estratégia de gestão integrada e abrangente do uso do solo. Conforme previamente descrito, procedeu-se à reconversão de áreas com elevada carga de combustível para usos do solo mais resilientes ao fogo. Especificamente, as formações arbustivas foram substituídas por pastagens espontâneas, as florestas de pinheiro-bravo por vinhas, as plantações de eucalipto por pastagens melhoradas, e as áreas dominadas por espécies invasoras por florestas de carvalhos autóctones. Esta abordagem baseou-se em modelos de combustível previamente definidos, assegurando uma redução substancial da biomassa disponível para combustão.

Para além da mitigação da severidade potencial dos incêndios, esta estratégia procurou articular-se com as dinâmicas socioeconómicas locais, promovendo a valorização da produção vitivinícola e o estímulo à atividade agropastoril. Desta forma, fomenta-se uma paisagem mais bem gerida, produtiva e menos vulnerável ao abandono, contribuindo para uma gestão territorial mais sustentável.

A Paisagem 3, ao abranger uma área mais extensa com intervenções orientadas para a redução da severidade, configura-se como uma solução conservadora e robusta. Apesar de implicar um maior investimento e esforço de implementação face à Paisagem 2, traduz-se numa diminuição mais consistente da presença de zonas suscetíveis a comportamentos extremos de fogo, reforçando a resiliência estrutural da paisagem florestal do Alto Minho a médio e longo prazo.

Em síntese, os resultados demonstram que a Paisagem 3 cumpre eficazmente os objetivos de uma gestão florestal integrada e estratégica, conjugando a redução do risco de incêndio com a manutenção das atividades económicas tradicionais e a adaptação às exigências impostas pelas alterações climáticas. Este cenário revela-se, assim, uma opção sólida para a mitigação da severidade dos incêndios na região.

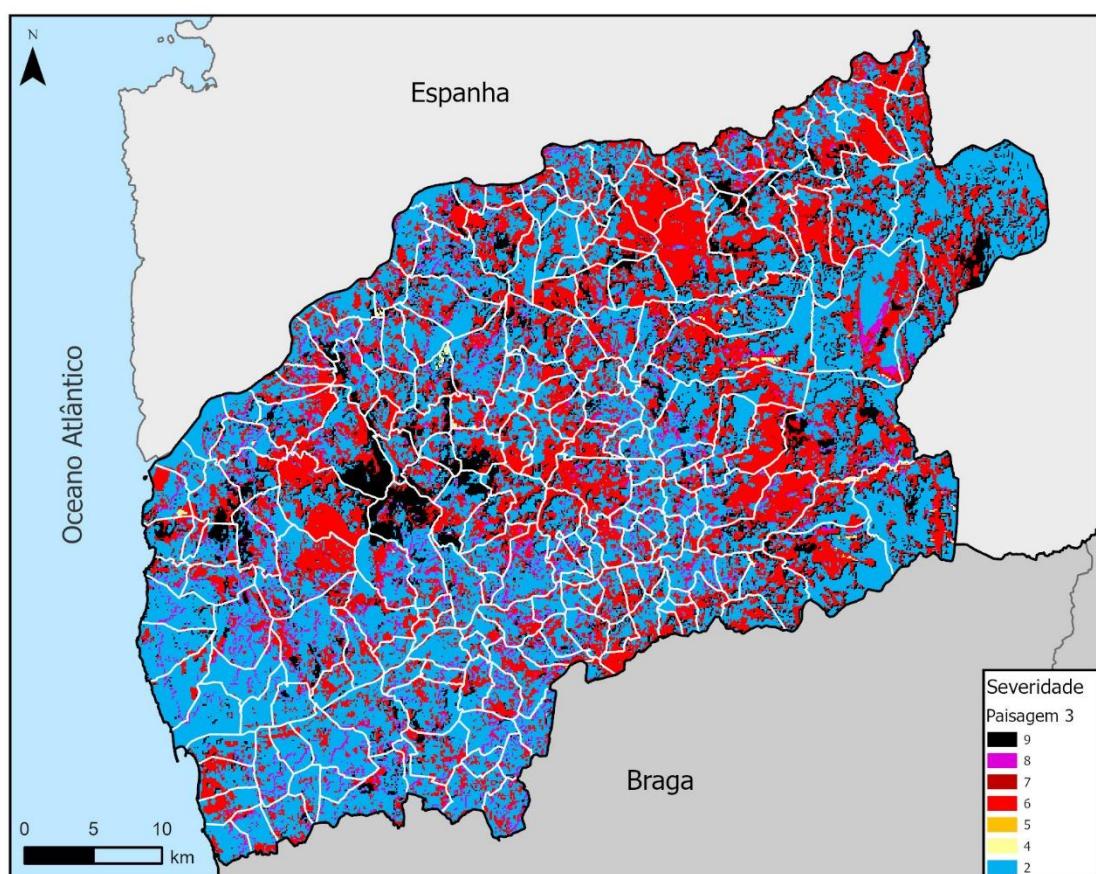


Figura 40. Modelo de severidade potencial do fogo para a paisagem 3.

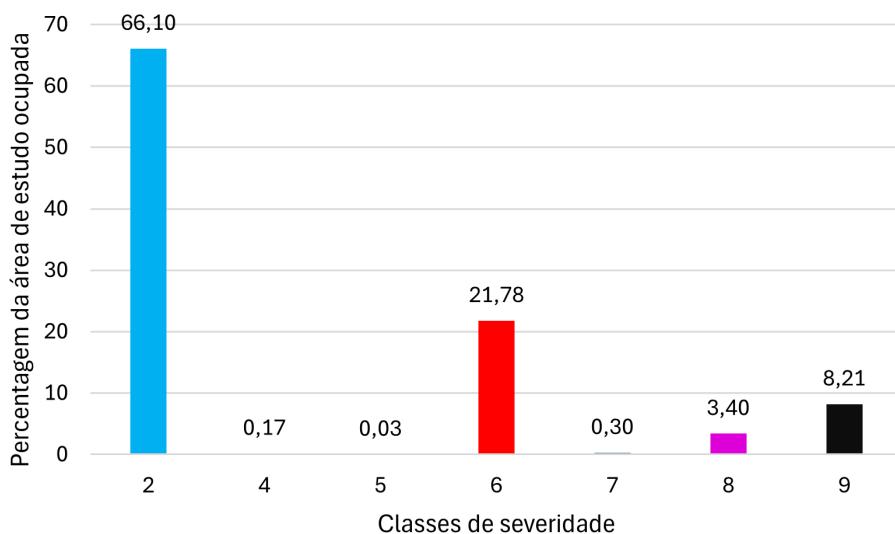


Figura 41. Percentagem do território ocupado por cada classe de severidade da paisagem 3.

A comparação entre os três cenários de paisagem relativamente à severidade do fogo no Alto Minho evidencia alterações significativas decorrentes das intervenções planeadas nas paisagens 2 e 3. A Paisagem 1 caracteriza-se por uma predominância das classes de severidade mais elevadas, com destaque para as classes 6, 8 e 9, que ocupam, respetivamente, 31,7%, 12,2% e 22,6% do território. Estes valores indicam uma elevada suscetibilidade a incêndios de severidade elevada e extrema.

Com a implementação das medidas propostas na Paisagem 2, observa-se uma redução substancial nas classes de severidade mais elevada (8 e 9), com a classe 9 a diminuir para 10,5% e a classe 8 para 4,7%. Esta redução reflete uma abordagem mais localizada e dirigida às áreas críticas. Simultaneamente, verifica-se um aumento da classe 2 para 53,1%, sugerindo uma expansão de áreas com menor severidade.

A Paisagem 3, que contempla uma intervenção mais abrangente, revela uma diminuição ainda mais acentuada das classes de severidade elevada. A classe 6 reduz para 21,8% e a classe 9 para 8,2%, enquanto a classe 2 aumenta para 66,1% da área total. Esta alteração resulta da substituição de usos do solo por coberturas com menor carga de combustível, como pastagens e vinhas.

A Serra de Arga constitui uma exceção, não apresentando variações significativas nos níveis de severidade, mesmo após as intervenções nos cenários 2 e 3.

A análise detalhada ao nível das freguesias revela que, no cenário atual, algumas apresentam uma elevada percentagem do território nas classes de severidade mais crítica, justificando a sua priorização nas estratégias de gestão. A freguesia de Cabana Maior destaca-se com mais de 75% da sua área na classe 6, evidenciando elevada carga de combustível e propensão para incêndios severos. A freguesia de Perre apresenta cerca de 56% da sua superfície na classe 8, enquanto Labruja regista 55% do território na classe 9.

No cenário da Paisagem 2, centrado na mitigação das classes 8 e 9, verifica-se que Perre passa a ter 82% do território classificado na classe 2, demonstrando a eficácia das intervenções. Em Labruja, a classe 2 torna-se também predominante, abrangendo 37% da área, confirmando o impacto positivo das medidas aplicadas.

Na Paisagem 3, que adota uma abordagem mais conservadora e extensiva, os efeitos são ainda mais evidentes. Em Cabana Maior, 50% do território passa a integrar a classe 2, refletindo a eficácia da conversão do uso do solo para coberturas de menor risco, como pastagens ou florestas de folhosas autóctones. Em Labruja, a classe 2 cobre 43% da área, enquanto em Perre esta classe atinge 92%, mantendo-se como a predominante, tal como no cenário anterior.

Em síntese, embora as alterações no uso do solo demonstrem um impacto positivo na redução da severidade do fogo na maioria da área de estudo, persistem núcleos críticos que requerem atenção prioritária. Estes resultados reforçam a necessidade de estratégias de gestão adaptativa, monitorização contínua e implementação de medidas complementares para promover a resiliência do território face ao risco de incêndio.

6. Incertezas, limitações e recomendações futuras

6.1. Incertezas

Apesar dos resultados obtidos, subsistem diversas incertezas que importa considerar na interpretação dos resultados. A modelação foi realizada com base em dados meteorológicos provenientes de uma estação localizada em Vigo, o que pode não refletir com precisão as condições microclimáticas específicas da área de estudo. Adicionalmente, os valores de humidade do combustível foram uniformemente aplicados a todos os modelos de combustível, desconsiderando as diferenças estruturais e funcionais entre os diversos tipos de vegetação representados.

Outro fator de incerteza reside na qualidade dos dados de entrada utilizados para os cenários das Paisagens 2 e 3, nomeadamente no que respeita à atualização dos modelos de combustível e da cartografia da cobertura florestal que foram realizados tendo por base combinações com a Carta de Uso e Ocupação do Solo de 2018. Estas limitações podem introduzir margens de erro nos valores estimados de severidade do fogo.

Por fim, persiste uma incerteza inerente à resposta ecológica das comunidades vegetais face às intervenções propostas. A dinâmica da regeneração, a resiliência das espécies e a evolução da estrutura da vegetação ao longo do tempo são variáveis complexas e dificilmente previsíveis, podendo influenciar significativamente a eficácia das medidas implementadas a médio e longo prazo.

Uma das incertezas relevantes associadas à implementação das intervenções propostas prende-se com a forma como estas serão recebidas pela comunidade local. A área de estudo é, em grande parte, constituída por propriedade privada, cujos proprietários poderão demonstrar resistência à adoção das medidas sugeridas. Tal resistência poderá resultar da relutância em investir na gestão ativa das suas parcelas ou do receio de perda de rentabilidade associada à substituição de espécies florestais economicamente valorizadas, como o eucalipto e o pinheiro-bravo.

Paralelamente, subsiste a incerteza quanto ao papel e à capacidade de resposta das instituições governamentais, nomeadamente no que respeita à disponibilização de

apoios técnicos, financeiros e logísticos que viabilizem a concretização das intervenções. A eficácia das medidas propostas dependerá, assim, não apenas da sua viabilidade técnica, mas também da aceitação social e do compromisso institucional com a sua implementação.

6.2. Limitações

Este estudo enfrentou diversas limitações ao longo da sua execução, as quais devem ser cuidadosamente consideradas na interpretação dos resultados. Uma das principais limitações prende-se com a utilização da Carta de Uso e Ocupação do Solo (COS 2018), que, apesar de ser uma fonte oficial, revelou inconsistências na representação da área de estudo, nomeadamente através da presença de áreas mal classificadas.

Adicionalmente, o modelo de combustível utilizado, embora proporcione uma representação razoável da vegetação existente, apresenta limitações significativas ao nível da resolução espacial. A dimensão dos pixéis (100 x 100 metros) é grande para captar a heterogeneidade do território, comprometendo a precisão das simulações. Um pixel com menor dimensão e maior resolução, por exemplo de 25 x 25 metros, permitiria uma caracterização mais detalhada e realista da distribuição do combustível.

Entre as limitações mais relevantes identificam-se ainda:

A dependência de modelos semiempíricos que, apesar de validados, simplificam a complexidade da vegetação. Estes modelos semi-empíricos, como o modelo de propagação de fogo de superfície de Rothermel (1972) e o modelo de iniciação de fogo de copa de Van Wagner (1977), baseiam-se em equações formuladas a partir de dados experimentais, assumindo, contudo, condições ambientais médias e estacionárias. Esta abordagem limita a sua capacidade de representar a complexidade e variabilidade das interações entre topografia, combustível e meteorologia. Assim, embora sejam ferramentas úteis para a estimativa de parâmetros gerais, como a taxa de propagação ou a intensidade da linha de fogo, estes modelos podem não captar adequadamente os comportamentos extremos observados em situações reais de incêndio.

A ausência de dados temporais detalhados, particularmente no que respeita à variação da humidade dos combustíveis entre diferentes modelos de combustível, o que limita a fiabilidade das simulações;

Adicionalmente, importa salientar que as paisagens utilizadas na modelação foram construídas sem a utilização da informação opcional relativa às copas, nomeadamente a Altura das Árvores, a Altura da Base da Copa e a Densidade de Copas, devido à indisponibilidade desses dados. Esta omissão pode comprometer a precisão na simulação da transição do fogo de superfície para fogo de copa, bem como na estimativa da intensidade associada a este tipo de propagação. Estas limitações metodológicas reforçam a necessidade de uma abordagem cautelosa na interpretação dos resultados obtidos, sublinhando a importância de dados mais completos para análises futuras mais robustas.

Estas limitações reforçam a necessidade de uma abordagem cautelosa na interpretação dos resultados. Recomenda-se que os mesmos sejam complementados com análises locais, validação em campo e atualizações regulares dos dados de entrada, de modo a garantir maior robustez e aplicabilidade prática das conclusões.

6.3. Recomendações futuras

Para colmatar as incertezas e limitações identificadas, recomenda-se o desenvolvimento de estudos complementares que incorporem dados de humidade do combustível específicos para cada modelo de combustível, permitindo uma modelação mais dinâmica e adaptativa. É igualmente importante promover programas de monitorização contínua da evolução da paisagem, garantindo a atualização regular dos modelos de combustível. A integração da modelação da severidade no Programa de Reordenamento e Gestão da Paisagem também seria uma medida com potencial para contribuir para uma melhor gestão da paisagem. Por fim, destaca-se a necessidade de integração de políticas públicas com enfoque na mobilização das comunidades locais, promovendo práticas de gestão sustentável e reforçando a resiliência dos territórios aos incêndios rurais.

7. Conclusões

O presente estudo teve como principal objetivo modelar a severidade potencial dos incêndios rurais na sub-região do Alto Minho, utilizando o simulador FlamMap. A investigação foi orientada por cinco objetivos específicos: (i) caracterizar o histórico de incêndios rurais na região; (ii) analisar os fatores que influenciam a severidade dos incêndios, nomeadamente a topografia, os modelos de combustível e a cobertura de copas; (iii) construir as paisagens no software FlamMap; (iv) modelar a severidade para diferentes cenários; e (v) propor estratégias de ordenamento e gestão florestal com vista à redução da severidade dos incêndios.

Os resultados obtidos demonstram que a severidade do fogo é fortemente condicionada por fatores físicos e biofísicos da paisagem. Verificou-se, em particular, que áreas com declives acentuados, elevada carga de combustível e densa cobertura de copas apresentam maior propensão para incêndios de elevada intensidade e com comprimentos de chama superiores. Os modelos gerados evidenciaram uma clara diferenciação espacial da severidade do fogo, revelando que alterações no uso do solo podem contribuir significativamente para a redução da severidade em zonas críticas. A aplicação de estratégias de gestão integrada mostrou-se eficaz na mitigação dos impactos dos incêndios, permitindo identificar áreas prioritárias para intervenção.

Contudo, este trabalho apresenta algumas limitações, nomeadamente no que respeita à disponibilidade e resolução dos dados de entrada, à utilização de modelos semi-empíricos que não captam totalmente a complexidade do comportamento do fogo, e à simulação sob condições ambientais constantes, que não refletem a variabilidade da humidade nos diferentes modelos de combustível. Acresce ainda a ausência de dados climáticos provenientes de estações meteorológicas localizadas na área de estudo.

Em síntese, este estudo evidenciou o potencial da modelação espacial como ferramenta de apoio ao ordenamento florestal e à definição de políticas de mitigação da severidade dos incêndios rurais. A aplicação prática deste tipo de análise pode contribuir para a identificação de áreas prioritárias de intervenção e para o desenvolvimento de estratégias mais eficazes na construção de paisagens mais resilientes ao fogo.

Para investigações futuras, recomenda-se a incorporação de dados dinâmicos sobre a humidade dos combustíveis, bem como a validação dos resultados através de dados empíricos recolhidos em campo após a ocorrência de incêndios reais. Sugere-se ainda o desenvolvimento de uma base de dados geográfica que integre a localização de infraestruturas críticas, áreas residenciais e património natural, de forma a tornar os modelos mais abrangentes e operacionais no contexto da gestão integrada do risco de incêndio.

Bibliografia

- Ager, A. A., Vaillant, N. M., & Finney, M. A. (2011). Integrating Fire Behavior Models and Geospatial Analysis for Wildland Fire Risk Assessment and Fuel Management Planning. *Journal of Combustion*, 2011(1). <https://doi.org/10.1155/2011/572452>
- AGIF. (2023). *Relatório anual de atividades do Sistema de Gestão Integrada de Fogos Rurais (SGIFR) 2023*.
- Albright, D., & Meisner, B. N. (1999). Classification of fire simulation systems.
- Anderson, H. E. (1982). Aids to determining fuel models for estimating fire behavior. *The Bark Beetles, Fuels, and Fire Bibliography*, 143.
- Bento-Gonçalves, A., Leite, F., & Vieira, A. (2019). Frequência, intensidade e severidade, três conceitos-chave no estudo dos incêndios florestais. In (pp. 31–41). https://doi.org/10.34037/978-972-8330-25-5_2_2
- Bergonse, R., Oliveira, S., Zêzere, J. L., Moreira, F., Ribeiro, P. F., Leal, M., & e Santos, J. M. L. (2022). Biophysical controls over fire regime properties in Central Portugal. *Science of The Total Environment*, 810, 152314.
- Butler, B., Anderson, W., & Catchpole, E. (2007). Influence of slope on fire spread rate. In: Butler, Bret W.; Cook, Wayne, comps. *The fire environment--innovations, management, and policy; conference proceedings*. 26-30 March 2007; Destin, FL. Proceedings RMRS-P-46CD. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. CD-ROM. p. 75-82,
- Countryman, C. (1972). The fire environment concept. USDA forest service, pacific southwest forest and range experiment station. *General Technical Report PSW*, 7, 12.
- Cruz, M. G. (2005). Guia fotográfico para identificação de combustíveis florestais-região Centro de Portugal.
- de Oliveira, E., & Fernandes, P. (2023). Uma cartografia aperfeiçoada das áreas ardidas no Alto Minho (Noroeste de Portugal) entre 2001 e 2020. *Finisterra*, 58(122), 15-38–15-38.
- Dias, M. G. (2023). *A gestão de combustíveis na redução dos fogos florestais na paisagem* Universidade de Lisboa (Portugal)].
- Fernandes, P., & Loureiro, C. (2022). *Modelos de combustível florestal para Portugal - Documento de referência, versão de 2021*.
- Fernandes, P., Pacheco, A., Almeida, R., & Claro, J. (2016). The role of fire suppression force in limiting the spread of extremely large forest fires in Portugal. *European Journal of Forest Research*, 135, 253–262. <https://doi.org/10.1007/s10342-015-0933-8>
- Fernandes, P., & Palheiro, P. (2015). *Interpretação dos índices do Sistema Canadiano de Indexação do Perigo de Incêndio Florestal*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3683.8568>
- Fernandes, P., Vale-Gonçalves, H., Loureiro, C., Fernandes, M., Costa, T., Cruz, M., & Botelho, H. (2009). *Modelos de Combustível Florestal para Portugal*.
- Finney, M. (2002). Fire growth using minimum travel time methods. *Canadian Journal of Forest Research-revue Canadienne De Recherche Forestiere - CAN J FOREST RES*, 32, 1420–1424. <https://doi.org/10.1139/x02-068>

- Finney, M. A. (1998). *FARSITE: Fire Area Simulator-model development and evaluation* (Res. Pap. RMRS-RP-4, revisto em 2004). <http://dx.doi.org/10.2737/RMRS-RP-4>
- Finney, M. A. (2006). An overview of FlamMap fire modeling capabilities. In: Andrews, Patricia L.; Butler, Bret W., comps. 2006. Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings. 28-30 March 2006; Portland, OR. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. 213-220,
- Finney, M. A., Brittain, S., Seli, R. C., McHugh, C.W., and Gangi, L. (2023). *FlamMap:Fire Mapping and Analysis System (Version 6.2) [Software]*. Available from <https://www.firelab.org/project/flammap>
- Hammill, K. A., & Bradstock, R. A. (2006). Remote sensing of fire severity in the Blue Mountains: influence of vegetation type and inferring fire intensity. *International Journal of Wildland Fire*, 15(2), 213–226.
- Han, D., Di, X., Yang, G., Sun, L., & Weng, Y. (2021). Quantifying fire severity: a brief review and recommendations for improvement. *Ecosystem Health and Sustainability*, 7(1), 1973346.
- ICNF. (2019). *6.º Inventário Florestal Nacional - Relatório Final*.
- ICNF. (2020). *Metodología para a produção da Carta de Perigosidade de Incêndio Rural de cariz estrutural: Relatório Definitivo*. <https://www.icnf.pt/api/file/doc/96bb210ebf341cda>
- ICONA. (1991). Clave fotografica para la identificación de modelos de combustible. *Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación*.
- IPMA. (2022). *Normal Climatológica – Viana Castelo / Meadela 1981-2010*
- Julião, R. P., Nery, F., Ribeiro, J. L., Castelo Branco, M., & Zêzere, J. (2009). Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de sistemas de informação geográfica (SIG) de base municipal. In: Autoridade Nacional de Protecção Civil.
- Keeley, J. E. (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity: A brief review and suggested usage [Article]. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 116–126. <https://doi.org/10.1071/WF07049>
- Lopes, A., Cruz, M. G., & Viegas, D. (2002). FireStation—an integrated software system for the numerical simulation of fire spread on complex topography. *Environmental Modelling & Software*, 17(3), 269–285.
- Lopes, S. M. G. (2013). *Modelos de previsão do teor de humidade de combustíveis florestais* Universidade de Coimbra (Portugal)].
- Mérida, A. C. C. (2010). Análise do comportamento do fogo na Mata Nacional de Leiria. *Relatório técnico*.
- Muñoz, R. (2000). La Defensa Contra Incendios Forestales Fundamentos y Experiencias.
- Oliveira, E., & Fernandes, P. M. (2023). Pastoral Burning and Its Contribution to the Fire Regime of Alto Minho, Portugal. *Fire*, 6(5), 210.
- Oliveira, R., de Abreu, A. C., & Correia, T. (2004). *Contributos para a identificação e caracterização da paisagem em Portugal Continental*. Direcção-Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano.

- Paixão, L. G. M. A. (2014). *Simulação de Comportamento de Fogo em Zonas Florestais no Alentejo Central Comparação de Modelos de Combustível* Universidade NOVA de Lisboa (Portugal)].
- Parente, J., & Pereira, M. G. (2016). Structural fire risk: The case of Portugal. *Science of The Total Environment*, 573, 883–893.
- Pastor, E., Zarate, L., Planas, E., & Arnaldos, J. (2003). Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science*, 29, 139–153. [https://doi.org/10.1016/S0360-1285\(03\)00017-0](https://doi.org/10.1016/S0360-1285(03)00017-0)
- Pereira, J., Silva, P., Melo, I., Oom, D., Baldassarre, G., & Pereira, M. (2022). *Cartografia de Regimes de Fogo à Escala da Freguesia (1980-2017)*.
- Pyne, S. J., Andrews, P. L., & Laven, R. D. (1996). *Introduction to wildland fire* [Book]. John Wiley and Sons.
- Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels* (Vol. 115). Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, US
- Ruiz González, A. D. (2004). *La predicción de la humedad en los restos forestales combustibles: aplicación a masas arboladas en Galicia Montes*].
- Sá, A. C. L., Benali, A., Aparicio, B. A., Bruni, C., Mota, C., Pereira, J. M. C., & Fernandes, P. M. (2023). A method to produce a flexible and customized fuel models dataset. *MethodsX*, 10, 102218. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mex.2023.102218>
- Scott, J. H., & Burgan, R. E. (2005). *Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model*. <http://dx.doi.org/10.2737/RMRS-GTR-153>
- Verde, J. C. (2008). *Avaliação da perigosidade de incêndio florestal* Universidade de Lisboa (Portugal)].

Bibliografia legislativa

Decreto Lei nº 82/2021 de 13 de outubro. Diário da República n.º 199/2021, Série I. Ministério do Ambiente e Ação Climática. Lisboa.

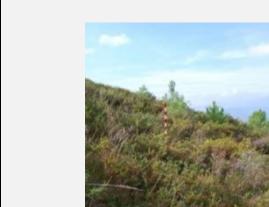
Anexo 1 – Tabela de descrição dos modelos de combustível retirado de Sá et al. (2023).

Breve descrição das classes de modelos de combustível portugueses (Fernandes et al., 2009) e uma imagem de exemplo correspondente. Os modelos de combustível estão organizados em três grupos: F (folhada); M (misto: folhada e vegetação rasteira); e V (vegetação rasteira, arbustos ou prados).

Os modelos de combustível americanos NFFL (Anderson, 1982) foram utilizados para representar dois tipos de vegetação distintos não incluídos nos modelos de combustível portugueses.

Para representar outros resíduos de madeira de exploração, com carga combustível inferior à do NFFL, foi utilizada uma outra classificação do National Fuel Models (Cruz, 2005), como é por exemplo o caso da seleção de postes em plantações de eucalipto.

GRUPO	Nº	CÓDIGO	DESCRIÇÃO	EXEMPLOS
F (Folhada) - O comportamento do fogo é determinado pela camada de folhada	211	F-EUC	Folhada de eucalipto	Plantações de eucalipto 
	212	F-FOL	Folhada de folhosas de folha caduca ou perene (2-5 t/ha)	Carvalhais de folha caduca, castanheiros, bétulas e faias. Floresta esclerófila densa, nomeadamente de sobreiro e azinheira 
	213	F-PIN	Folhada de coníferas com agulhas médias a longas (4-7 t/ha)	Pinhais de <i>P. pinaster</i> , <i>P. pinea</i> , <i>P. halepensis</i> , <i>P. radiata</i> 
	214	F-RAC	Folhada de coníferas de agulha curta. A quantidade de detritos lenhosos pode ser substancial (4-6 t/ha)	Povoamentos florestais de <i>Pseudotsuga</i> , <i>Cedrus</i> , <i>Cupressus</i> , <i>Camacari's</i> , <i>Pinus sylvestris</i> . Podem ser incluídas outras folhadas muito compactadas, por exemplo, <i>Acacia spp.</i> 
M (misto) - Tanto a folhada como a vegetação rasteira têm uma cobertura significativa e impulsoram a propagação do fogo	221	M-CAD	Folhada de folha caduca e um sub-bosque arbustivo, geralmente com muito combustível vivo (8-17 t/ha)	Povoamentos de carvalhos, castanheiros, bétulas e faias 
	222	M-ESC	Folhada de folhosas esclerófilas perenes e um sub-bosque arbustivo (7-17 t/ha)	Povoamentos de sobreiro e azinheira 
	223	M-EUC	Folhada de eucalipto e um sub-bosque de arbustos (9-18 t/ha)	Plantações florestais de eucalipto 
	224	M-EUCd	Folhada descontínua de eucalipto com ou sem componente arbustiva (1-4 t/ha)	Plantações de eucalipto jovens ou recentemente cefadas 
	225	M-F	Lixo e um sub-bosque de fetos	Povoamentos florestais, independentemente da espécie 

V (sub-bosque, arbustos ou prados) - O comportamento do fogo é controlado por arbustos ou vegetação lenhosa nos arbustos	226	MH	Folhada e um sub-bosque de erva (2-5 t/ha)	Povoamentos florestais, independentemente da espécie	
	227	MPIN	Folhada de coníferas de agulha média a longa com sub-bosque arbustivo (8-18 t/ha)	Povoamentos florestais de <i>P. pinaster</i> , <i>P. pinea</i> , <i>P. halepensis</i> , <i>P. radiata</i> , <i>P. nigra</i>	
	231	VHa	Erva alta (>0,5m) (2-4 t/ha)	Relvados, prados, pastagens, pousios recentes. Terras de cultivo de cereais. Canaviais. Sistemas agro-florestais.	
	232	VHb	Erva baixa (<0,5m) (~1 t/ha)	Relvados, prados, pastagens, pousios recentes. Restos de cereais. Sistemas agro-florestais.	
	233	VMAa	Arbustos altos (>1 m) com grande quantidade de folhagem morta e/ou fina (12-27 t/ha)	Urzes, tojos, matos de giestas antigas; povoamentos jovens de acácias. Povoamentos florestais abertos ou jovens, independentemente da espécie, com um estrato arbustivo constituído por essas espécies. Regeneração natural densa de pinheiros.	
	234	VMAb	Arbustos baixos (<1 m) com grande quantidade de folhagem morta e/ou fina (7-14 t/ha)	Matos e chamecas de urze, tojo, carqueja, zimbro. Povoamentos abertos ou jovens, independentemente da espécie, com estrato arbustivo constituído por aquelas espécies.	
	235	VMH	Arbustos baixos (< 1 m) verdes, frequentemente incêndio descontínuo e comervas	Arbustos até 3 anos desde o último incêndio	
	236	VMMa	Arbustos altos (>1 m) pobres em combustível morto e/ou com folhagem relativamente grosseira (10-19 t/ha)	Arbustos de giesta, <i>Cistus</i> spp., <i>Quercus</i> coccifera e outras espécies esclerófilas mediterrânicas. Povoamentos jovens de <i>Hakea</i> . Amoreiras. Povoamentos florestais abertos ou jovens, independentemente da espécie, com um estrato arbustivo constituído por estas espécies	
	237	VMMb	Arbustos baixos (<1 m) com pouco combustível morto e/ou com folhagem relativamente grosseira (4-8 t/ha)	Arbustos de giesta, <i>Cistus</i> spp., <i>Quercus</i> coccifera e outras espécies esclerófilas mediterrânicas. Povoamentos jovens de <i>Hakea</i> . Amoreiras. Povoamentos florestais abertos ou jovens, independentemente da espécie, com um estrato arbustivo constituído por estas espécies	

Modelos de combustível NFFL	4	NFFL4	Regeneração muito densa de pinheiro-bravo com uma altura de 3-6 m (~32 t/ha), tipicamente com 5-15 anos de idade	
	11	NFFL11	Folhas lenhosas abatidas e mortas provenientes do abate de árvores, frequentemente intercaladas com vegetação herbácea (~28 ton/ha). Povoamentos/plantações florestais após a colheita ou poda e desbaste pesados ou talhadia.	
Resíduos de exploração	238	RESE-01	Folhas lenhosas abatidas e mortas na seleção de postes em plantações florestais de eucalipto	

Anexo 2- Freguesias do Alto Minho

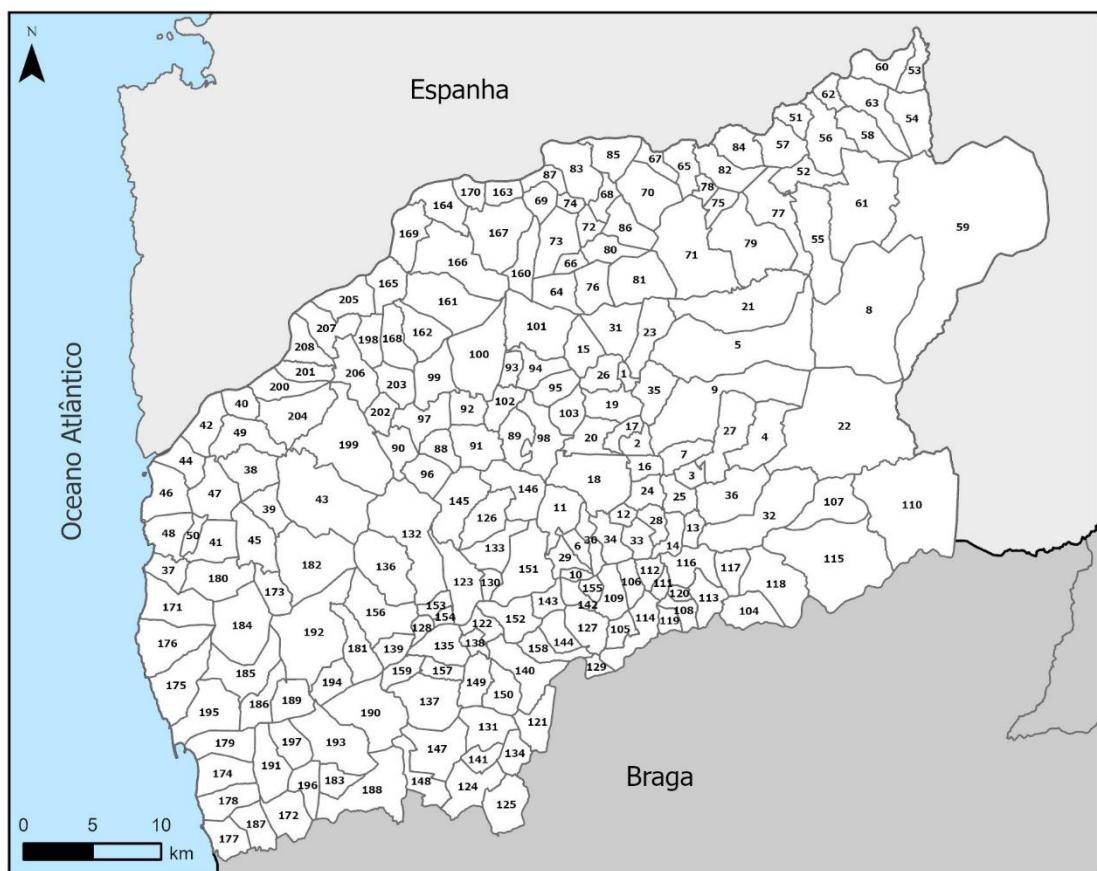


Figura 42. Freguesias do Alto Minho

Tabela 5. Freguesias do Alto Minho

Freguesia	Número de Freguesia	Freguesia	Número de Freguesia
Aboim das Choças	1	Boivães	105
Aguiã	2	Bravães	106
Ázere	3	Britelo	107
Cabana Maior	4	Cuide de Vila Verde	108
Cabreiro	5	Lavradas	109
Cendufe	6	Lindoso	110
Couto	7	Nogueira	111

Gavieira	8	Oleiros	112
Gondoriz	9	Sampriz	113
Jolda (São Paio)	10	União das freguesias de Crasto, Ruivos e Grovelas	114
Miranda	11	União das freguesias de Entre Ambos-os-Rios, Ermida e Germil	115
Monte Redondo	12	União das freguesias de Ponte da Barca, Vila Nova de Muíá e Paço Vedro de Magalhães	116
Oliveira	13	União das freguesias de Touvedo (São Lourenço e Salvador)	117
Paçô	14	União das freguesias de Vila Chã (São João Baptista e Santiago)	118
Padroso	15	Vade (São Pedro)	119
Prozelo	16	Vade (São Tomé)	120
Rio de Moinhos	17	Anais	121
Rio Frio	18	Arca e Ponte de Lima	122
Sabadim	19	Arcozelos	123
Senharei	20	Ardegaõ, Freixo e Mato	124
Sistelo	21	Associação de freguesias do Vale do Neiva	125
Soajo	22	Bárrio e Cepões	126
União das freguesias de Alvora e Loureda	23	Beiral do Lima	127
União das freguesias de Arcos de Valdevez (Salvador), Vila Fonche e Parada	24	Bertiandos	128
União das freguesias de Arcos de Valdevez (São Paio) e Giela	25	Boalhosa	129
União das freguesias de Eiras e Mei	26	Brandara	130
União das freguesias de Grade e Carralcova	27	Cabaços e Fojo Lobal	131
União das freguesias de Guilhadeses e Santar	28	Cabração e Moreira do Lima	132
União das freguesias de Jolda (Madalena) e Rio Cabrão	29	Calheiros	133
União das freguesias de Padreiro (Salvador e Santa Cristina)	30	Calvelo	134

União das freguesias de Portela e Extremo	31	Correlhã	135
União das freguesias de São Jorge e Ermelo	32	Estorãos	136
União das freguesias de Souto e Tabaçô	33	Facha	137
União das freguesias de Távora (Santa Maria e São Vicente)	34	Feitosa	138
União das freguesias de Vilela, São Cosme e São Damião e Sá	35	Fontão	139
Vale	36	Fornelos e Queijada	140
Âncora	37	Friastelas	141
Argela	38	Gandra	142
Dem	39	Gemieira	143
Lanhelas	40	Gondufe	144
Riba de Âncora	41	Labruja	145
Seixas	42	Labrujó, Rendufe e Vilar do Monte	146
União das freguesias de Arga (Baixo, Cima e São João)	43	Navió e Vitorino dos Piães	147
União das freguesias de Caminha (Matriz) e Vilarelho	44	Poiares	148
União das freguesias de Gondar e Orbacém	45	Rebordões (Santa Maria)	149
União das freguesias de Moledo e Cristelo	46	Rebordões (Souto)	150
União das freguesias de Venade e Azevedo	47	Refóios do Lima	151
Vila Praia de Âncora	48	Ribeira	152
Vilar de Mouros	49	Sá	153
Vile	50	Santa Comba	154
Alvaredo	51	Santa Cruz do Lima	155
Cousso	52	São Pedro d'Arcos	156
Cristoval	53	Seara	157
Fiães	54	Serededelo	158
Gave	55	Vitorino das Donas	159

Paderne	56	Boivão	160
Penso	57	Cerdal	161
São Paio	58	Fontoura	162
União das freguesias de Castro Laboreiro e Lamas de Mouro	59	Friestas	163
União das freguesias de Chaviães e Paços	60	Ganfei	164
União das freguesias de Parada do Monte e Cubalhão	61	São Pedro da Torre	165
União das freguesias de Prado e Remoães	62	União das freguesias de Gandra e Taião	166
União das freguesias de Vila e Roussas	63	União das freguesias de Gondomil e Sanfins	167
Abedim	64	União das freguesias de São Julião e Silva	168
Barbeita	65	União das freguesias de Valença, Cristelo Covo e Arão	169
Barroças e Taias	66	Verdoejo	170
Bela	67	Afife	171
Cambeses	68	Alvarães	172
Lara	69	Amonde	173
Longos Vales	70	Anha	174
Merufe	71	Areosa	175
Moreira	72	Carreço	176
Pias	73	Castelo do Neiva	177
Pinheiros	74	Chafé	178
Podame	75	Darque	179
Portela	76	Freixieiro de Soutelo	180
Riba de Mouro	77	Lanheses	181
Segude	78	Montaria	182
Tangil	79	Mujães	183
Trute	80	Outeiro	184
União das freguesias de Anhões e Luzio	81	Perre	185
União das freguesias de Ceivães e Badim	82	Santa Marta de Portuzelo	186

União das freguesias de Mazedo e Cortes	83	São Romão de Neiva	187
União das freguesias de Messegães, Valadares e Sá	84	União das freguesias de Barroselas e Carvoeiro	188
União das freguesias de Monção e Troviscoso	85	União das freguesias de Cardielos e Serreleis	189
União das freguesias de Sago, Lordelo e Parada	86	União das freguesias de Geraz do Lima (Santa Maria, Santa Leocádia e Moreira) e Deão	190
União das freguesias de Troporiz e Lapela	87	União das freguesias de Mazarefes e Vila Fria	191
Agualonga	88	União das freguesias de Nogueira, Meixedo e Vilar de Murteda	192
Castanheira	89	União das freguesias de Subportela, Deocriste e Portela Susã	193
Coura	90	União das freguesias de Torre e Vila Mou	194
Cunha	91	União das freguesias de Viana do Castelo (Santa Maria Maior e Monserrate) e Meadela	195
Infesta	92	Vila de Punhe	196
Mozelos	93	Vila Franca	197
Padornelo	94	Cornes	198
Parada	95	Covas	199
Romarigães	96	Gondarém	200
Rubiães	97	Loivo	201
União das freguesias de Bico e Cristelo	98	Mentrestido	202
União das freguesias de Cossourado e Linhares	99	Sapardos	203
União das freguesias de Formariz e Ferreira	100	Sopo	204
União das freguesias de Insalde e Porreiras	101	União das freguesias de Campos e Vila Meã	205
União das freguesias de Paredes de Coura e Resende	102	União das freguesias de Candemil e Gondar	206
Vascões	103	União das freguesias de Reboreda e Nogueira	207
Azias	104	União das freguesias de Vila Nova de Cerveira e Lovelhe	208