



Universidade de Aveiro

2022

**Mafalda Maria
Moniz da Roias**

**Estimar as consequências das alterações
climáticas nos incêndios florestais utilizando
índices meteorológicos**



Universidade de Aveiro

2022

**Mafalda Maria
Moniz da Roias**

**Estimating consequences of climate
change for the forest fire using meteorological
indices**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Ciências do Mar e da Atmosfera, realizada sob a orientação científica da Doutora Susana Cardoso Pereira Firmino Vaz, Investigadora Doutorada e coorientação do professor Doutor Alfredo Moreira Caseiro Rocha, Professor Associado c/ Agregação, ambos do Departamento de Física da Universidade de Aveiro.

Agradecimentos

Terminar esta dissertação representa uma conquista pessoal: o culminar de mais uma etapa e o começo de tantas outras. Foram cinco anos nesta casa que é a Universidade de Aveiro, e que tão bem me acolheu, que foram vividos como uma montanha-russa de emoções com muitos altos e baixos pelo caminho. Assim, não poderia deixar de aproveitar este momento especial e dedicar algumas palavras a todos os que me acompanharam e me permitiram chegar até aqui.

Em primeiro lugar agradeço à minha orientadora, Susana Cardoso Pereira por todo o conhecimento transmitido e disponibilidade que sempre demonstrou ao longo deste último ano e, em segundo lugar, ao meu coorientador Alfredo Rocha por todo o conhecimento transmitido durante as unidades curriculares que me lecionou e que fomentaram o meu interesse nesta área.

Agradeço, em especial, ao Pedro por todo o apoio, compreensão, motivação e carinho que me deu nestes 5 anos, em que muitas das vezes a vontade de desistir estava lá. Aos meus pais, aos meus irmãos, por todo o apoio que me deram ao longo deste percurso académico. Foram muitas as saudades de casa, os momentos difíceis e as lágrimas escondidas atrás de um ecrã, mas foram ainda mais frequentes os sorrisos e as conquistas partilhadas todos os dias através de uma chamada.

À Diana, hoje amiga de uma vida, obrigada por tudo. Obrigada por todo o apoio, amizade e companhia em muitos momentos em que me sentia sozinha. Por entre as noites de estudo, foram muitos os sorrisos e os bons momentos partilhados. Foste casa. E como se dizia “o que Aveiro une ninguém separa”.

À família Ribau que me acolheram como se fosse família, agradeço por todo o apoio e carinho.

Aos meus colegas de residência, Alexandre, Maria, Marco e Sara, agradeço todos os bons momentos partilhados.

Aos meus amigos de sempre, foram cinco anos longe de casa e vocês são a prova de que a verdadeira amizade não se mede pela distância.

A todos os professores que fizeram parte do meu percurso estudantil, dedico também uma palavra especial de apreço e agradecimento por toda a atenção dedicada.

o júri

presidente

Prof. Doutor José Manuel Henriques Castanheira
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

vogais

Prof. Doutor Mário Jorge Modesto Gonzalez Pereira
professor auxiliar da Universidade de Trás-Os-Montes e Alto Douro

Doutora Susana Cardoso Pereira Firmino Vaz
Investigadora Doutorada (nível 1) da Universidade de Aveiro

palavras-chave

Alterações climáticas, Fire Weather Indice, EURO-CORDEX, Modelos Numérico, Dias de Risco de Incêndio

resumo

Os incêndios florestais são a principal perturbação nos ecossistemas florestais do sul da Europa. Nos últimos anos, tem ocorrido uma série de grandes incêndios em Portugal Continental, como resultado do aumento da temperatura. Embora estes grandes incêndios florestais representem apenas uma pequena fração do total de ocorrências, são responsáveis por uma elevada percentagem de área ardida mantendo a tendência observada na região mediterrânica. Assim, estudar as condições atmosféricas que originaram a ocorrências de grandes e incêndios e, conseqüentemente, realizar projeções futuras, através do Fire Weather Indice, são os objetivos principais deste estudo. Prevê-se que no futuro o risco de perigo de incêndio aumente, principalmente no interior centro e sul e que o número de dias com risco moderado, elevado e muito elevado aumente em praticamente todo o território, com exceção do litoral. No futuro projeta-se agravamento das condições atmosféricas, mais quentes e secas, que afetam o potencial risco de incêndio.

keywords

Climatic change, Fire Weather Indices, EURO-CORDEX, Numeric Models, Fire risk days

abstract

Wildfire is the main disturbance in forests ecosystems of southern Europe. In recent years, a series of major fires had occurred in Mainland Portugal, as a result of the increase in temperature. Although these large forest fires represent only a small fraction of the total occurrences, they are responsible for a high percentage of burned area upholding the trend observed in the Mediterranean region. Thus, studying the atmospheric conditions that led to the occurrence of large wildfires and consequently, making future projections, through the Fire Weather Index, are the main objectives of this study. It is expected that in the future the risk of fire danger will increase, mainly in the central and southern interior of Portugal, and that the number of days with moderate, high and very high risk will increase in practically the entire territory, with the exception of the coastal area. In the future, Warmer and drier conditions are projected that will affect potential risk for wildfires.

Índice

1.	Introdução.....	1
1.1.	Objetivos da dissertação	4
1.2.	Estrutura da dissertação.....	4
2.	Estado de Arte.....	5
3.	Dados e Métodos	9
3.1.	Caraterísticas da Área de Estudo	9
3.2.	Dados	10
3.2.1.	Simulações do modelo WRF.....	10
3.2.2.	Simulações Climáticas - Indicadores de Perigo de Incêndio Florestal	12
a)	Fire Weather Indice	13
b)	Dados de modelo FWI e índices derivados.....	14
c)	nDays.....	14
3.2.2.1.	Descrever os Modelos Climáticos	14
3.3.	Metodologia	17
3.3.1.	Análise das condições médias da atmosfera durante incêndios	17
3.3.2.	Análise dos dados climáticos.....	17
4.	Resultados e Discussão	19
4.1.	Condições médias em incêndios históricos	19
4.1.1.	Variáveis meteorológicas	19
4.1.2.	Índice HAINES e HDW	20
4.1.3.	Índices de Estabilidade	20
4.2.	FWI histórico e futuro.....	22
4.2.1.	Validação do Ensemble	22
4.2.2.	Máximos Diários FWI.....	23
4.2.3.	Ensemble Histórico e Futuro	25
4.2.4.	Variável ndays.....	28
4.2.4.1.	Número de dias com risco moderado.....	28
4.2.4.2.	Número de dias com risco elevado.....	31
4.2.4.3.	Número de dias com risco muito elevado	34
4.2.4.4.	Ensemble Histórico e Futuro	36
4.2.4.4.1.	Número de dias com risco moderado.....	36
4.2.4.4.2.	Número de dias com risco elevado.....	37
4.2.4.4.3.	Número de dias com risco muito elevado	38

4.3.	Condições atmosféricas propícias a incêndios	42
4.3.2.	FWI	42
4.3.3.	Temperatura a 2 metros.....	43
4.3.4.	Humidade Relativa	45
4.3.5.	Vento horizontal aos 10 metros.....	46
5.	Conclusão	47
6.	Referências.....	49

Índice de Figuras

Figura 1- Mapa físico da área de estudo e os das quatro sub-regiões (Trigo et al., 2016). N-Norte, NW-Noroeste, SW-Sudoeste e E-Este.....	9
Figura 2- Estrutura do índice meteorológico de perigo de incêndio.....	13
Figura 3- Representação espacial dos valores médios diários da a) temperatura a 2 metros de altitude; b) humidade relativa; c) precipitação total; d) vento horizontal a 10 metros de altitude.	19
Figura 4- Representação espacial do média diária dos índices a) HAINES; b) HDW.	20
Figura 5- Representação espacial da média diária do a) LCL; b) LFC; c) índice CIN; d) índice CAPE.	21
Figura 6- Representação espacial da média diária da altitude da camada limite planetária.	22
Figura 7- Representação do FWI para o mês de julho de 2021 através de (a) ensemble Mean, (b) Reanálises.	23
Figura 8- Representação espacial dos máximos diários do FWI para o período de referência (1986-2005) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.....	24
Figura 9- Representação espacial dos máximos diários do FWI para o período futuro (2046-2065) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.	25
Figura 10- Representação espacial dos valores médios diários do FWI a) a partir de dados de ensemble mean para período de referência (1986-2005); b) a partir do ensemble multi-modelo para período de referência (1986-2005); c) a partir do ensemble multi-modelo para período futuro (2046-2065).....	27
Figura 11- Representação espacial da diferença entre o ensemble multi-modelo para período futuro (2046-2065) e o período de referência (1986-2005).....	28
Figura 12- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco moderado de incêndio para o período histórico (1986-2005) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.	30
Figura 13- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco moderado de incêndio para o período futuro (2046-2065) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.....	30
Figura 14- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco moderado de incêndio para o período futuro (2081-2100) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.....	31
Figura 15- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco elevado de incêndio para o período histórico (1986-2005) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.....	32
Figura 16- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco elevado de incêndio para o período futuro (2046-2065) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.....	33
Figura 17- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco elevado de incêndio para o período futuro (2081-2100) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.....	33
Figura 18- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco muito elevado de incêndio para o período histórico (1986-2005) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.....	35

Figura 19- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco muito elevado de incêndio para o período futuro (2046-2065) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.....	35
Figura 20- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco muito elevado de incêndio para o período futuro (2081-2100) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.....	36
Figura 21- Representação espacial do ensemble multi-modelo do número de dias com risco moderado de incêndio para a) o período histórico (1986-2005); b) o período futuro 2046-2065; c) o período futuro 2081-2100.....	37
Figura 22- Representação espacial do ensemble multi-modelo do número de dias com risco elevado de incêndio para a) o período histórico (1986-2005); b) o período futuro 2046-2065; c) o período futuro 2081-2100.....	38
Figura 23- Representação espacial do ensemble multi-modelo do número de dias com risco muito elevado de incêndio para a) o período histórico (1986-2005); b) o período futuro 2046-2065; c) o período futuro 2081-2100.....	39
Figura 24- Representação espacial da diferença entre o ensemble multi-modelo da variável número de dias com risco moderado para a) período futuro (2046-2065) e o período de referência (1986-2005); b) período futuro (2081-2100) e o período de referência (1986-2005);	40
Figura 25- Representação espacial da diferença entre o ensemble multi-modelo da variável número de dias com risco elevado para a) período futuro (2046-2065) e o período de referência (1986-2005); b) período futuro (2081-2100) e o período de referência (1986-2005);.....	41
Figura 26- Representação espacial da diferença entre o ensemble multi-modelo da variável número de dias com risco elevado para a) período futuro (2046-2065) e o período de referência (1986-2005); b) período futuro (2081-2100) e o período de referência (1986-2005);.....	42
Figura 27- Representação espacial do FWI para o dia a) 23 de julho b) 24 de julho; c) 25 de julho; d) 26 de julho; e) 27 de julho e f) 28 de julho do ano 2055.	43
Figura 28- Representação espacial da temperatura a 2 metros para o dia a) 23 de julho b) 24 de julho; c) 25 de julho; d) 26 de julho; e) 27 de julho e f) 28 de julho do ano 2055.	44
Figura 29- Representação espacial da humidade relativa para o dia a) 23 de julho b) 24 de julho; c) 25 de julho; d) 26 de julho; e) 27 de julho e f) 28 de julho do ano 2055.	45
Figura 30- Representação espacial do vento horizontal aos 10 metros para o dia a) 23 de julho b) 24 de julho; c) 25 de julho; d) 26 de julho; e) 27 de julho e f) 28 de julho do ano 2055.	46

Índice de Tabelas

Tabela 1- Descrição dos índices que estimam uma medida da instabilidade atmosférica..	11
Tabela 2- Classes do FWI de acordo com EFFIS (European Forest Fire Information System).	14
Tabela 3- GCM/RCM par e cenário climático utilizado para produzir os valores de FWI derivados das simulações climáticas. Note: RCP = Representative Concentration Pathway.	16

1. Introdução

As alterações climáticas são umas das maiores preocupações ambientais que a humanidade enfrenta. O Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC) define alterações climáticas como alterações no estado do clima que podem ser identificados através de alterações na estatística do clima, como na média ou variabilidade de algumas variáveis, que persistem por um longo período de tempo (à escala de décadas ou maior). Há alterações resultantes de processos internos naturais, por exemplo, alterações nos ciclos solares, erupções vulcânicas ou alterações na composição da atmosfera que se confundem com alterações climáticas, mas que na verdade são processos naturais intensificados pela ação antropogénica. Estes *feedbacks* climáticos são processos cíclicos, em cascata, que aumentam ou diminuem o efeito dos forçadores chave climáticos iniciais. Um desses exemplos está relacionado com o aumento da frequência de incêndios rurais¹ e concomitante libertação de dióxido de carbono (Goosse et al., 2008-2010).

De acordo com o último relatório do Painel Intergovernamental para Alterações Climáticas (IPCC 2021), estima-se que o aquecimento global atinja 1.5°C entre 2030 e 2052, e que até ao final do século, 2046-2065, ocorra um aumento de cerca de 2°C da temperatura máxima e mínima na Península Ibérica, principalmente na região centro e sul (Carvalho et al., 2020). Como consequência, projeta-se o aumento da frequência e intensidade de eventos extremos, tais como, ondas de calor, secas, inundações e incêndios florestais (Carvalho et al., 2021).

Portugal Continental situa-se no extremo Sudoeste do continente europeu Península Ibérica, fazendo fronteira a norte e leste com a Espanha, a oeste e sul com o oceano Atlântico. Assim sendo, existem diferenças complexas em todo o território. O litoral e região norte apresenta um clima temperado caracterizado por invernos chuvosos e amenos, e verões secos e suaves com pequenas variações de temperatura (IPMA). A região interior e sul apresenta um clima temperado com verão quente e seco e invernos frios. Existem também áreas localizadas na parte sudeste de Portugal, Alentejo Sul (região de Beja), caracterizada por um clima semi-árido com verões muito quentes e com valores extremamente baixos de precipitação. De acordo com essas características climáticas e adicionado as alterações climáticas, prevê-se um aumento significativo de eventos extremos, tais como ondas de calor e consequentemente a ocorrência de incêndios florestais, nomeadamente as regiões centro e sul, que são responsáveis por graves impactos económicos, sociais, ambientais e nas atividades humanas (Carvalho et al., 2020).

Os incêndios florestais são um fenómeno complexo devido à grande interação que existe entre a topografia do local, tipo de combustíveis presentes, fogo e condições atmosféricas (Carmo et al., 2021). Assim sendo, torna-se por vezes difícil prever acertadamente o risco de ocorrer um incêndio devido à sua complexidade, falta de dados de entrada que existe nas bases de dados e, também, baixa resolução dos modelos de previsão. As condições meteorológicas típicas que favorecem a ocorrência de um incêndio caracterizam-se pela presença de vento e de uma atmosfera instável, quente e seca (F.Srock et al., 2018). Por serem reconhecidos como um

¹ A terminologia incêndios rurais é usada em Portugal para incluir os fogos florestais (wildfires). Consultar informação em <http://www.procv.pt/>.

processo de escala global, afetam a composição química da troposfera, com impactos ecológicos e climáticos profundos (LePage et al., 2005).

Em Portugal cerca de 5.1 milhões de ha dizem respeito a florestas (PORDATA, 2019) ocupado por pinheiros, seguido de eucaliptos e sobreiros (COS, 2018). Os distritos de Castelo Branco, Coimbra e Viseu apresentam maioritariamente florestas compostas por pinheiro bravo, enquanto que Aveiro e Santarém caracterizam-se por áreas florestais constituídas por eucaliptos. Nos distritos de Évora, Santarém, Portalegre e Setúbal representam a maioria da percentagem existente em Portugal de sobreiros. Em Vila Real, Guarda e Bragança é mais comum áreas florestais compostas por carvalho. Para além disso, em algumas regiões norte e centro do país, tornam-se particularmente complexas no que trata ao planeamento de controle de incêndios e consequentemente, combate. Nestas regiões, existem muitos terrenos que não se tem informação dos proprietários e até mesmo terrenos que se encontram abandonados devido à idade avançada dos mesmos. Enquanto que, nos distritos de Beja, Évora e Portalegre apesar de estas regiões atingirem temperaturas elevadas durante o verão e apresentarem taxas de precipitação mais baixas durante todo o ano, apresentam um regime demográfico diferente e caracterizam-se por terem florestas mais resistentes a incêndios florestais. O aumento da população próximo de áreas florestais aumenta o risco de incêndio florestal, e consequentemente, aumenta a destruição de bens e vidas humanas dificultando operações de combate a incêndios florestais (Carvalho et al., 2008).

As condições meteorológicas desempenham um papel fundamental, tanto na ignição como durante a propagação do fogo (Pereira et al., 2005). Em dias típicos de verão a Circulação Sinóptica caracteriza-se, normalmente, por fluxos de Norte ou Anticiclónicos, ocorrendo em menor frequência durante os Episódios Extremos de Incêndios Florestais (EWP) (Carmo et al., 2021). A circulação Norte caracteriza-se por um anticiclone bem definido posicionado próximo do arquipélago dos Açores, produzindo ventos de norte que são reforçados pelo desenvolvimento de uma baixa térmica localizada no centro de Espanha. A circulação Ciclónica é mais frequente de ocorrer durante os EWP e poderá contribuir para aliviar as condições meteorológicas nos últimos dias críticos de um EWP, contudo não obtiveram um resultado seguro (Carmo et al., 2021). O estado do tempo, incluindo temperatura, precipitação, vento e humidade atmosférica, são aspetos críticos da atividade dos incêndios. Carmo et al (2011) verificaram que o estado do tempo atmosférico e a humidade do combustível estão intimamente relacionados com a área ardida, enquanto as ignições do fogo são principalmente causadas pelo homem sejam negligentes ou criminosas (Carvalho et al., 2010). Por outro lado, o clima, determina o tipo de vegetação e quantidade de combustível disponível, num dado local e tempo (Wang et al., 2015).

Nas últimas décadas, o regime de incêndios florestais tem vindo a intensificar-se em Portugal e em muitas regiões Mediterrâneas, em que alguns estudos consideram que mudanças na agricultura e no uso da terra (Fernandes et al., 2012) possam estar na origem deste aumento, para além do aumento da temperatura e diminuição da precipitação em Portugal (Carvalho et al., 2010). De acordo com o 8º Relatório provisório do ICNF, no período compreendido entre 1 de janeiro a 15 de outubro de 2020 registram-se um total de 9394 incêndios rurais responsáveis por 65887 hectares de área ardida, dos quais incluem-se zonas habitacionais, matos e terrenos agrícolas.

O último incêndio de grandes proporções em Portugal ocorreu a 17 de junho de 2017 e foi dado como extinto a 24 de junho de 2017, em Pedrogão Grande tendo-se estendido aos concelhos vizinhos. O incêndio deflagrou num dia caracterizado por situação de calor e secura

extrema, instabilidade atmosférica com ocorrência de trovoadas, sem precipitação e rajadas de vento, em que o risco de índice Conjuntural e Meteorológico era de risco Muito Elevado (Moreira et al., 2017). O incêndio provocou a morte de 66 pessoas, atingiu 261 habitações e destruiu cerca de 53 mil hectares de território, 20 mil hectares dos quais de floresta. Os prejuízos estimados totalizaram um valor superior a 500 milhões de euros, dos quais fazem parte prejuízos na floresta, habitações, agricultura, indústria e turismo (Observador, 2018).

Para além dos impactos socioeconómicos que os incêndios acarretam, as emissões de incêndios florestais podem afetar o ecossistema envolvente e a saúde humana, contribuindo para o aquecimento global, o que poderá resultar num feedback positivo, onde o aquecimento global resulta em mais incêndios, consequentemente teremos mais aquecimento e assim por diante (Carvalho et al., 2010).

1.1. Objetivos da dissertação

As condições meteorológicas são, sem dúvida, a melhor previsão da atividade regional de incêndios por períodos de tempo de um mês ou mais (Abatzoglou e Kolden 2013; Cary et al., 2006). Embora a velocidade do vento possa ser o principal fator meteorológico que afeta o crescimento do fogo, de um incêndio individual, numerosos estudos sugerem que a temperatura é a variável mais importante para a frequência anual global de incêndios, em zonas pródigas em silvicultura; temperaturas mais quentes conduzem ao aumento da atividade dos incêndios (Flannigan et al., 2005, 2009; Parisien et al., 2011).

Surge, assim, uma série de índices, que associam condições atmosféricas, utilizando diretamente variáveis meteorológicas com o potencial de risco de incêndio. Um desses indicadores é muito usado pelas agências canadianas de gestão de incêndios, que utilizam o sistema Canadiao Forest Fire Weather Index (FWI) (Van Wagner 1987), um subsistema do Canadian Forest Fire Danger Rating System (CFFDRS) (Stocks et al. 1989) para avaliar o relativo perigo de incêndio florestal para a proteção das comunidades e interesses económicos associados às florestas.

É, portanto, crucial tentar-se examinar as mudanças climáticas extremas nas variáveis meteorológicas, bem como avaliar os fatores que contribuem para as mudanças e que podem potenciar um aumento do potencial risco de incêndio.

Com o objetivo de minimizar os impactos que os incêndios causam, pretende-se com este trabalho estudar o potencial risco de ocorrência de incêndio através do cálculo de índices de risco de incêndio. Neste estudo proponho a dar resposta a três objetivos: i) que condições atmosféricas são responsáveis por originar grandes incêndios florestais em Portugal? ii) o que podemos esperar para os próximos anos?

1.2. Estrutura da dissertação

O presente trabalho está estruturado da seguinte maneira: no Capítulo 1 encontra-se a Introdução e objetivos do presente trabalho. No Capítulo 2 é apresentado o Estado de Arte, onde são referenciados os estudos que já foram desenvolvidos sobre incêndios florestais. Os dados utilizados e a metodologia adotada são descritos detalhadamente no Capítulo 3. No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados do trabalho. Primeiramente, apresentou-se as condições médias para um conjunto de incêndios históricos. De seguida, os resultados obtidos para o risco de perigo de incêndio, obtidos a partir do índice FWI, para ambos os períodos selecionados. Por último, no Capítulo 5, apresentam-se as conclusões do presente trabalho.

2. Estado de Arte

O aquecimento global é uma preocupação global e é apontado, por diversos estudos, como a causa principal para o aumento sem precedentes de eventos extremos (Moriundo et al., 2006, Abatzoglou et al., 2018, Pereira et al., 2021, Rodrigues et al., 2020), neste caso concreto incêndios florestais (Ganteaume et al., 2021). Assim, nos últimos anos, grande parte dos trabalhos de investigação que se tem vindo a realizar dedicam-se em compreender como as condições atmosféricas propícias a incêndios visualizado através do FWI, têm respondido ao aquecimento global (Moriundo et al., 2006, Flannigan et al., 2015). O estudo de Moriundo et al., 2006 focou-se em estudar os efeitos das alterações climáticas no risco e na duração da época de incêndios na região mediterrânea. Os autores utilizaram o Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) para o presente e dois cenários climáticos futuros de acordo com o IPCC. Os dois cenários utilizados mostraram um aumento do risco de incêndio, com forte impacto nas zonas com elevada cobertura vegetal (Alpes, Pireneus em Espanha). A duração da época de incêndios correlacionou-se com condições atmosféricas secas e quentes (Península Ibérica e Grécia) e observou-se um aumento da mesma, ou seja, persistência de dias com FWI superior a 45 durante sete dias consecutivos. Neste estudo (Flannigan et al., 2015), os autores utilizaram as componentes do Canadian Forest Fire Weather System para avaliar a sensibilidade da humidade do combustível às mudanças de temperatura e precipitação, e que implicações terá num clima futuro (Flannigan et al., 2016). O estudo de Abatzoglou et al., 2018, procurou estudar através de 17 modelos climáticos quando é que mudanças nas condições atmosféricas propícias a incêndios ultrapassam os valores esperados, através do FWI (Índice Meteorológico de Perigo de Incêndio Florestal), como consequência das mudanças climáticas antropogénicas. Os resultados destacam aumentos nas condições atmosféricas propícias a incêndios como consequência das mudanças climáticas causadas pelo homem, visto que a extensão geográfica de área ardida duplica para um aumento da temperatura global de 2 °C para 3 °C (Abatzoglou et al., 2019).

A quantidade de precipitação na época dos incêndios e na estação anterior, primavera, (Pereira et al., 2005) e o aumento da temperatura (Carvalho et al., 2021) como consequência das alterações climáticas são os principais responsáveis pelos aumentos de FWI para toda a bacia Euro-Mediterrânica, e consequentemente o aumento do perigo de incêndio (Kovats et al. 2014, Barbero et al., 2020, Fargeon et al., 2020, Rovithakis et al. 2022). No entanto, a relação que existe entre as condições atmosféricas e ocorrência de incêndios não é linear e depende de outros fatores, tais como, cobertura de terra, quantidade de combustível, estratégias e práticas de combate a incêndios. A humidade do combustível é apontada como a principal componente que influencia o perigo de incêndio, em que o número de incêndios ou a área queimada respondem positivamente à diminuição da humidade do combustível (Dupuy et al., 2020). O estudo de Moreira et al., 2011 revisitou o conhecimento científico disponível sobre a relação entre paisagens e incêndios florestais na região do Mediterrâneo, com objetivo de definir diretrizes e políticas de gestão ambiental capazes de diminuir o risco de incêndio. Os autores consideram que o aumento da frequência de incêndios promove paisagens homogêneas cobertas de matagais que aumentam o risco de incêndio florestal e que a cobertura do solo, relacionada com a estrutura da vegetação e carga do combustível, é a única variável que influencia o comportamento do fogo e pode ser manipulada.

Em Portugal, a evolução socioeconómica e demográfica do meio rural, bem como as características ambientais traduzem-se em fatores que potenciam a ocorrência de incêndios, onde a incidência de incêndios florestais é espacialmente acentuada (Fernandes 2019) numa

área relativamente pequena. O estudo de *Carmo et al., 2011*, teve como objetivo analisar e compreender os padrões de ignição e propagação de um incêndio com o objetivo de desenvolver informação que permita preparar as equipas de planeamento e gestão de incêndios, contribuindo para a redução do risco e perigo de incêndio. Os autores consideram que a cobertura do solo, características topográficas (declive e aspeto) e uso da terra são características importante a serem estudadas. Para Portugal a classificação que é feita de perigo de incêndio, com base no FWI, é calibrada para indicar a dificuldade de extinção de incêndio determinada pela intensidade de pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Ait.) existente nas zonas mais propensas a incêndios florestais, considerando cinco classes: baixo ($FWI < 8.4$), moderado ($8.5 < FWI < 17.1$), elevado ($17.2 < FWI < 24.5$), muito elevado ($FWI > 38.2$) (*Fernandes 2019*). O estudo de *Fernandes 2019* teve como objetivo estabelecer limiares diários das condições atmosféricas propícias a incêndios (fire weather) associados ao aumento do número de incêndios extremos em Portugal no período de 2001-2011, utilizando a base de dados nacional de incêndios florestais e o índice FWI e regressão logística. Os resultados mostram que regiões caracterizadas por terrenos irregulares tendem a ter menor quantidade de terrenos agrícolas, maior quantidade de floresta inflamável e mais matagal. Relativamente aos valores do índice FWI observou-se que existe uma variação inter-regional do perigo de incêndio, dado que existe gradientes leste-oeste e sul-norte, como consequência da influência oceânica, onde as regiões noroeste de Portugal (Viana do castelo, Braga, Porto, Aveiro) com clima mais temperado caracterizam-se por valores de FWI mais baixos, enquanto que a região sul (Évora e Beja), mais quente e mais seco, apresenta valores mais alto de FWI. Para além disso, o aumento relativo dos limiares do FWI para risco extremo de incêndio ($FWI=38$) foi registado em todas as regiões, exceto Viana do castelo. Aliás, os limiares de FWI variam regionalmente de acordo com os gradientes biofísicos, sendo que a resistência à propagação do fogo diminui em topografias mais complexas e quando a matéria orgânica e a ocupação de floresta inflamável ou matagal aumentam.

É importante relacionar as condições atmosféricas com a ocorrência de incêndios para escalas de tempo diferentes, com objetivo de compreender que condições atmosféricas propiciam a ocorrência de incêndios florestais, como é o caso dos estudos de *Hernandez et al., 2015*, *Barbero et al., 2019*, *Turco et al., 2019*, *Ruffault et al., 2017*. Os estudos concluem que, por exemplo, para uma escala de tempo mais longa as condições atmosféricas mais secas registadas no Sul da Europa foram responsáveis pela quantidade de área ardida nesta região, conjugado com as altas temperaturas. Para escalas de tempo mais curtas, como foi o verão de 2003 e 2016 na França Mediterrânica, detetou-se que existiu uma mudança nas condições atmosféricas que conduziram a incêndios florestais de grandes dimensões, devido à interação entre diferentes tipos de clima e tipos de seca (*Ruffault et al., 2017*), no entanto, é preciso ter em atenção a complexidade dos mecanismos que envolvem a humidade do combustível e o fogo florestal (*Pimont et al., 2019*). O estudo de *Carvalho et al., 2008* teve como objetivo principal realizar uma análise espaço temporal da área ardida e número de incêndios florestais por distrito, em Portugal, através da relação entre o clima, as componentes do sistema FWI juntamente com a área ardida e número de ocorrências em 11 distritos. O estudo teve um contributo importante na previsão da quantidade de área ardida e número de incêndios florestais num cenário climático futuro, em que os resultados mostraram que o clima explica a maior parte da variância da área ardida e número de incêndios.

Os impactos das alterações climáticas nas características das ondas de calor que ocorrem nos meses de verão, tais como, duração e intensidade, serão responsáveis pelo aumento na duração e intensidade das mesmas, principalmente num futuro a longo prazo (2080-2100) (*Pereira et al.,*

2017). Assim, a identificação e caracterização de ondas de calor num cenário de clima atual e num cenário futuro, e como estas podem vir a influenciar a ocorrência de incêndios florestais extremos é de extrema importância. O desenvolvimento de ondas de calor deve-se principalmente à presença persistente de um sistema de altas pressões, ou seja, transporte anticiclónico de ar quente e seco da Europa Continental ou Deserto do Saara, principalmente durante os meses de verão, e por isso, Portugal Continental é caracterizado como vulnerável à ocorrência de temperaturas extremas (Parente et al., 2018). O estudo de Parente et al., 2018 conclui que o período de ocorrência das ondas de calor compreende-se de maio a outubro, em que a região nordeste e sul do país registam maior número de ocorrências. Existe claramente uma relação no período de coincidência de um episódio extremo de incêndio florestal com ocorrência de onda de calor, onde 97% do número total de incêndios florestais extremos estava ativo durante uma onda de calor. Prevê-se que o número de ondas de calor, a duração e amplitude das mesmas aumente até ao final do século XXI.

As projeções climáticas, mais concretamente, para a bacia do Mediterrâneo convergem para um aumento da intensidade e frequência de eventos extremos, tais como, secas e ondas de calor (Ruffault et al., 2018), tornando-se cada vez mais importante compreender as relações clima-incêndio para as próximas décadas, e consequentemente a identificação antecipada dos mesmos. A realização de projeções de perigo de incêndio num cenário climático futuro têm vindo a ser desenvolvidas por alguns estudos, (Carvalho et al., 2010, Turco et al., 2018, Russo et al., 2019), através de modelos climáticos, em que o principal objetivo prende-se com o que poderemos esperar durante o próximo século. Os resultados obtidos sugerem que é na bacia do Mediterrâneo que se concentram as temperaturas mais elevadas durante o verão, precedido pela ocorrência de eventos de seca na primavera ou início de verão. Contudo, para escalas regionais ainda existe alguma falta de informação (Fargeon et al., 2020). O estudo de Turco et al., 2016 analisou as tendências mais recentes de incêndios para a Península Ibérica, sul de França, Itália e Grécia, através de uma base de dados de incêndios para o período 1980-2011, em que os resultados obtidos mostram que as tendências negativas poderão estar relacionadas com um maior esforço na prevenção e gestão de incêndios e que as tendências positivas se relacionam, possivelmente, com alterações nas configurações da paisagem, juntamente com o aquecimento global. O estudo de Fargeon et al., 2020, focou-se em avaliar o impacto das alterações climáticas na França, através de projeções futuras com base no índice FWI. Os resultados obtidos mostram que valores muito elevados de FWI em algumas regiões, como exemplo a zona do Mediterrâneo, poderão estar associados à baixa incerteza dos modelos. Outros fatores, para além da incerteza dos modelos, associados a uma má gestão por partes das entidades competentes também contribuem para as incertezas obtidas para escalas espaciais menores, dificultando a capacidade de se prever antecipadamente a ocorrência de incêndios florestais. O estudo de Dupuy et al., 2020 procurou rever 23 estudos que estudavam projeções relacionadas com a atividade de incêndios florestais para um cenário de clima futuro à escala local, regional e continental. Os resultados obtidos sugerem que, sob cenários com emissões de gases com efeito de estufa, estima-se que, de acordo com as projeções futuras obtidas, haverá um aumento do risco de incêndio e área ardida que varia, em média, de 2 a 4% para 5 a 50% por década. Além disso, afirmam que as projeções climáticas, obtidas através de modelos climáticos com base na influência dos combustíveis, do qual fazem parte os feedbacks incêndio-vegetação e fatores humanos, são os principais fatores que afetam a incerteza das projeções climáticas. O estudo de Carvalho et al., 2010 também sugere que em estudos futuros é importante ter em consideração nas projeções a ação humana, visto que, alterações no uso da terra e estratégias de combate a incêndios são um fator importante a ter em conta.

O estudo de Carmo et al., 2021, dedicou-se em avaliar as tendências gerais definindo os Períodos Extremos de Incêndios Florestais (EWP) utilizando diferentes limites para a área ardida através de um método semiautomático, que se tornou vantajoso principalmente para escalas espaciais menores, estabeleceram relações entre padrões sinóticos e tipos de circulação (CWT), analisaram condições antecedentes através de índices que fornecem classificações de seca. Os resultados obtidos mostram que a ocorrência de EWP coincide, na grande maioria, com a ocorrência de fluxos secos e quentes devido à presença, no quadrante NW, de fluxos anticiclônicos do tipo N, NE e E, contudo, podem ainda ocorrer episódios extremos durante a aproximação de depressões localizadas a oeste e noroeste da Península Ibérica, que transportam massas de ar vindas de sul (tipos C, S e SE). Os autores defendem que, a seca não é uma condição suficiente para ocorrência de episódios extremos de incêndios, apesar de a maioria dos EWP ter ocorrido em situações de seca em que a taxa de propagação diminui exponencialmente com o teor de humidade de combustível morto.

A recuperação florestal realizada ao longo dos últimos anos, como resultado da diminuição de atividades agrícolas, distância entre habitações e florestas tiveram uma contribuição importante nas paisagens na região Mediterrânica nos últimos 150 anos. Como consequência, a quantidade de combustível disponível aumentou, criando condições favoráveis para a propagação do fogo e, conseqüentemente, ocorrência de grandes incêndios (Abadie et al., 2019).

Nos últimos anos tem surgido um esforço crescente de pesquisa na Europa sobre o risco de incêndio e quais as projeções futuras para a europa, contudo ainda existem algumas limitações resultantes das incertezas das projeções climáticas e dos modelos utilizados para as projeções do risco de incêndio ou atividade (Dupuy et al., 2020). Em muitos estudos considera-se que a baixa resolução dos modelos utilizados, faz com que muitas das vezes, não se possa utilizar os resultados para escalas locais, como é o caso do mediterrâneo (Moriundo et al., 2006). Vários estudos concluíram que a incerteza das projeções climáticas provém de três fontes distintas: variabilidade interna ou intrínseca do sistema climático (flutuações naturais), incerteza do modelo (diferentes modelos respondem de forma diferente ao mesmo forçamento) e a incerteza do cenário (diferentes cenários de emissão ou diferentes corridas, levam a diferentes forçamentos radiativos. Assim, a abordagem mais comum para avaliar o grau de incerteza é gerar um conjunto de simulações a partir de um conjunto de modelos (ensemble), seguindo cenários contrários (Dupuy et al., 2020). Vários estudos seguiram essa abordagem para a realização das projeções de risco de incêndio ou atividade de incêndio, concluindo que as incertezas resultantes dos modelos climáticos tiveram impactos significativos nas projeções de incêndios florestais (Sousa et al., 2015, Turco et al., 2018).

3. Dados e Métodos

3.1. Características da Área de Estudo

A área de estudo deste trabalho é Portugal Continental, embora na nossa análise gráfica apresente-se parte do território espanhol para uma análise mais completa. A parte continental de Portugal localiza-se no extremo Sudoeste da Península Ibérica entre 36°N e 42°N de latitude e 10°W e 6°E de longitude (Figura 1).

O tempo e o clima na Península Ibérica são influenciados pela sua posição de transição subtropical no lado ocidental europeu (Rodrigues et al., 2020), sua posição entre o Oceano Atlântico e o Mar Mediterrâneo e orografia (cadeias montanhosas). Assim, distinguem-se quatro áreas com características diferentes: (i) o litoral norte, (ii) as regiões centro-oeste estendendo-se até ao litoral sul, (iii) a costa mediterrânica e a (iv) costa atlântica ocidental. As variáveis precipitação e temperatura apresentam fortes gradientes norte-sul e oeste-este, e variabilidade sazonal e interanual muito acentuada. A região noroeste caracteriza-se por ser um dos locais mais húmidos da Europa, atingindo nalguns locais valores superiores a 3000 mm (Soares et al., 2015). Em várias zonas do Alentejo, por outro lado, a precipitação anual não ultrapassa os 500 mm.

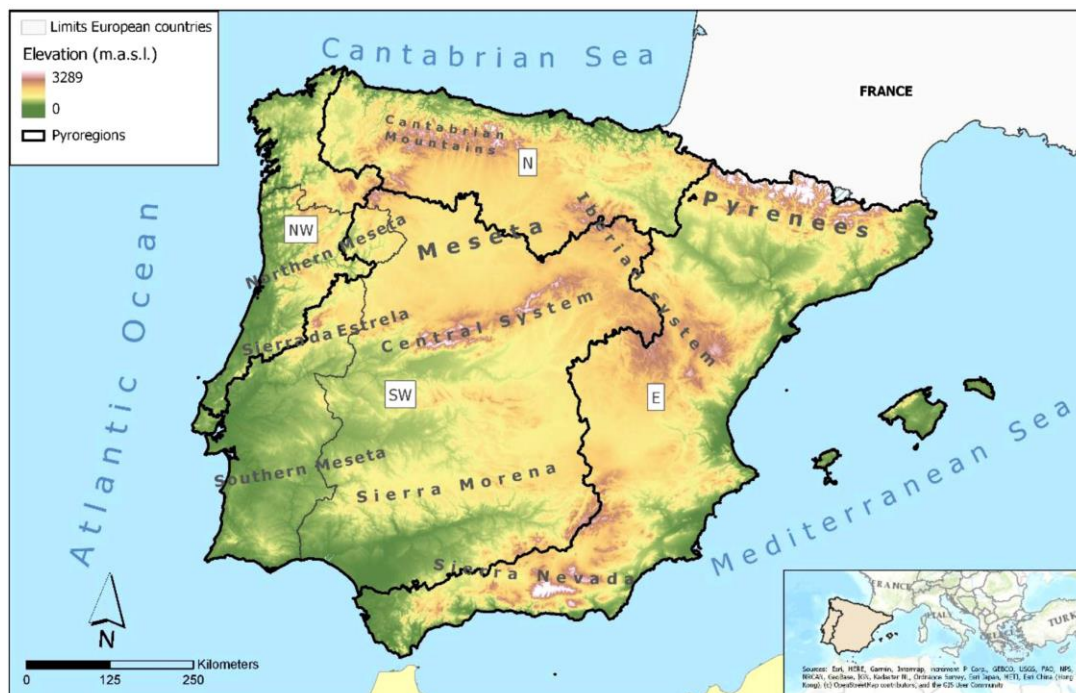


Figura 1- Mapa físico da área de estudo e os das quatro sub-regiões (Trigo et al., 2016). N-Norte, NW-Noroeste, SW-Sudoeste e E-Este.

3.2. Dados

Neste estudo são usados vários tipos de dados de origens diferentes. Na primeira parte desta tese são usados dados de simulações do modelo Weather Research Forecast (WRF) para obter simulações numéricas de diferentes variáveis atmosféricas durante episódios de incêndios. A segunda fonte de dados inclui as projeções climáticas históricas e futuras, obtidas a partir da iniciativa EURO-CORDEX no âmbito do Projeto de Intercomparação do Modelo Mundial de Investigação Climática fase 5 (CMIP5).

3.2.1. Simulações do modelo WRF

Os dados do modelo utilizados foram desenvolvidos a partir do modelo WRF, tendo sido executadas 89 simulações para cada incêndio. O conjunto de dados agrupa valores horários de eventos de incêndio referentes ao período de 2000-2019, com uma resolução espacial de $1.5^\circ \times 1.5^\circ$, para as variáveis atmosféricas humidade relativa, temperatura a 2 metros, precipitação total, componente zonal e meridional do vento a 10 metros, altitude da camada limite planetária. A partir destas obteve-se um conjunto de variáveis derivada, nomeadamente os índices de incêndio, tais como, o índice de HAINES, o índice Hot-Dry-Windy (WDY) e outros índices que estimam uma medida da instabilidade atmosférica, como o nível de condensação (LCL), o índice de ascensão (LFC), o índice de inibição de convecção (CIN), e a energia potencial disponível para convecção (CAPE), descritos com maior detalhe na tabela seguinte. Importa referir que as simulações utilizadas fazem parte de um projeto anterior, do qual não faço parte, ForecastFire que tinha como objetivo avaliar a incerteza associada às previsões de incêndio. Fez-se uma lista de 89 incêndios de 2000 a 2019 e recriou-se em modo de previsão. Pôs-se o modelo a correr para a zona de ocorrência do modelo e extraiu-se para o dia ou dias do incêndio as variáveis atmosféricas e a partir destas obteve-se um conjunto de variáveis derivada.

O objetivo de se utilizar estes dados serve para fornecer uma caracterização das condições médias da atmosfera durante um incêndio, com objetivo de se realizar, posteriormente, uma comparação com as projeções futuras realizadas.

O índice de Haines encontra-se descrito no artigo *Haines Index (Park 2018)*, em que o autor faz uma descrição completa sobre o índice. O índice HI é usado na gestão de controle de incêndios para avaliar o potencial de ocorrência de incêndios de grandes dimensões. É definido como um índice de Severidade da baixa atmosfera, onde a convecção vertical é mais importante do que os ventos horizontais. O cálculo do índice é feito para duas componentes, a componente de estabilidade (1), correspondente à diferença da temperatura entre dois níveis de pressão, e a componente de humidade (2), correspondente à depressão do ponto de orvalho, ambas calculadas em três níveis diferentes. Os valores elevados de HI correspondem a alto potencial para ocorrer um incêndio e valores baixos de HI o potencial é baixo.

$$(1) T_{950} - T_{850}$$

$$(2) (T - T_D)_{850}$$

O Hot-Dry-Windy encontra-se descrito no artigo *The Hot-Dry-Windy Index: A New Fire Weather Index (Srock et al., 2018)* define um novo índice meteorológico HDW. É definido avaliando como a atmosfera poderá afetar um incêndio, ajudando as equipas de gestão de incêndios florestais a determinar quais dias são mais propensos a apresentar condições atmosféricas que facilitam a deflagração de um incêndio florestal. O cálculo do índice é feito multiplicando o VPD (3), definido como o défice de pressão de vapor, que corresponde à

diferença entre pressão de vapor de saturação (e_s) e pressão de vapor (e), pela velocidade do vento (U).

$$(3) \text{ VPD}(T, q) = e_s(T) - e(q)$$

$$(4) \text{ HDW} = U \times \text{VPD}(T, q) (\text{hPa m s}^{-1})$$

Tabela 1- Descrição dos índices que estimam uma medida da instabilidade atmosférica.

Acrónimo do Índice	Explicação	Unidades	Interpretação
LCL	Nível de condensação é a altura a que a que uma parcela de ar se torna saturado quando sobe adiabaticamente a partir da superfície.	m	
LFC	Nível de convecção livre é o nível em que uma parcela de ar sobe a adiabaticamente até saturação e se torna mais quente do que a sua envolvente numa atmosfera condicionalmente instável representando a taxa vertical da temperatura no ambiente.	m	
LI	Índice de ascensão (lifted index) é calculado como sendo a diferença entre a temperatura da atmosfera (T) a 500 hPa e a temperatura de uma parcela de ar (PRCL) aos 500 hPa, que sobe adiabaticamente desde a superfície até aos 500 hPa.		Quando mais negativo for LI mais instável é a atmosfera. LI = -2 instabilidade fraca; LI entre -3 a -5 instabilidade moderada. LI <= -6 instabilidade forte.
CIN	Índice de inibição de convecção. Representa a energia necessária para elevar uma parcela de ar até ao nível de convecção livre (LFC). Quanto maior for CIN, menor é a probabilidade de ocorrência de tempestades severas. CIN resulta, frequentemente, de uma inversão ou camada estável superior.	J/kg	Valores de CIN superiores a 200 J/kg inibem, significativamente o potencial convectivo.
CAPE	Energia potencial disponível para convecção (convective available potential energy). O CAPE pode ser relacionado com a velocidade vertical máxima (W_{max}) através da relação $W_{max} = (2 * CAPE)^{1/2}$ Na realidade, trocas de água com o ar ambiente, entre outros factores, podem reduzir (W_{max}) a metade.	J/kg	0 – Estável; 0-1000 – marginalmente instável; 1000-2500 – moderadamente instável; 2500-3500 – muito instável; > 3500 extremamente instável.

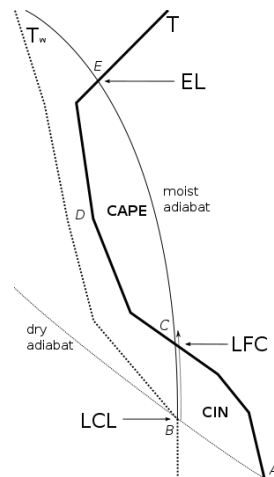


Diagrama explicativo que apresenta o trajeto de uma parcela de ar em ascensão ao longo de B-C-E comparada com a massa de ar envolvente. No diagrama as letras representam os índices descritos e ainda a temperatura (T), a humidade (Tw) e o nível de equilíbrio (EL).

3.2.2. Simulações Climáticas - Indicadores de Perigo de Incêndio Florestal

Nos últimos anos tem sido observado aumentos na frequência de ocorrência de incêndios, em diferentes partes do globo. Para estudar o sinal da mudança climática escolheram-se vários índices derivados de simulações do modelo Global ECMWF Fire Forecast (GEFF) obtidos na plataforma *Copernicus*, e desenvolvidos pelo Centro Europeu de Previsão a Média Prazo (ECMWF). O conjunto de dados apresenta projeções de indicadores de perigo de incêndio para a Europa com base no Sistema Canadano de Índice de Meteorologia de Incêndios (FWI) em condições climáticas históricas e futuras. Neste conjunto de dados, os valores diários do FWI e outros indicadores derivados do FWI, foram simulados utilizando o modelo GEFF forçado com modelos da iniciativa EURO-CORDEX para estimar o perigo de incêndio, em futuros cenários climáticos. Estes indicadores incluem o número de dias com condições moderadas, elevadas ou muito elevadas de risco de incêndio, classificadas pelo Sistema Europeu de Informação de Incêndios Florestais (EFFIS) durante a época de incêndios do hemisfério norte (junho-setembro). Nas secções seguintes explica-se em detalhe cada um destes conceitos.

a) Fire Weather Indice

O FWI nasce no Canada, desenvolvido pelo *Canadian Forest Service*, e reflete o impacto das variáveis meteorológicas na humidade dos combustíveis presentes no solo florestal, com objetivo de estimar o perigo de incêndio em escalas de tempo diárias e mensais. O sistema é composto por seis componentes (Figura 2), das quais três correspondem a índices de humidade para três tempos de resposta de combustível diferentes que estudam a influência das condições atmosféricas sobre o teor de humidade dos combustíveis mortos (the Fine Fuel Moisture Code, FFMC; the Duff Moisture Code, DMC; and the Drought Code, DC). Os outros três índices descrevem o potencial de propagação do fogo (the Initial Spread Index, ISI), consumo de combustíveis (the Buildup Index, BUI) e intensidade do incêndio (Fire Weather Index, FWI) como combinação dos índices anteriores. O cálculo dos índices é feito diariamente, às 12:00 UTC, utilizando temperatura do ar, humidade relativa, velocidade do vento e precipitação acumulada das 24-h anteriores (Dupuy et al., 2020). O índice meteorológico de perigo de incêndio florestal (FWI) considera apenas parâmetros meteorológicos, desconsiderando a topografia e inclinação do terreno e tipos de vegetação, bem como características relacionadas que podem afetar a propagação do fogo, como fragmentação do uso da terra e topografia. Para esse fim, o FWI geralmente é usado junto com os limites relacionados que funcionam bem para regiões e tipos de vegetação específicos (Rovithakis et al., 2022).

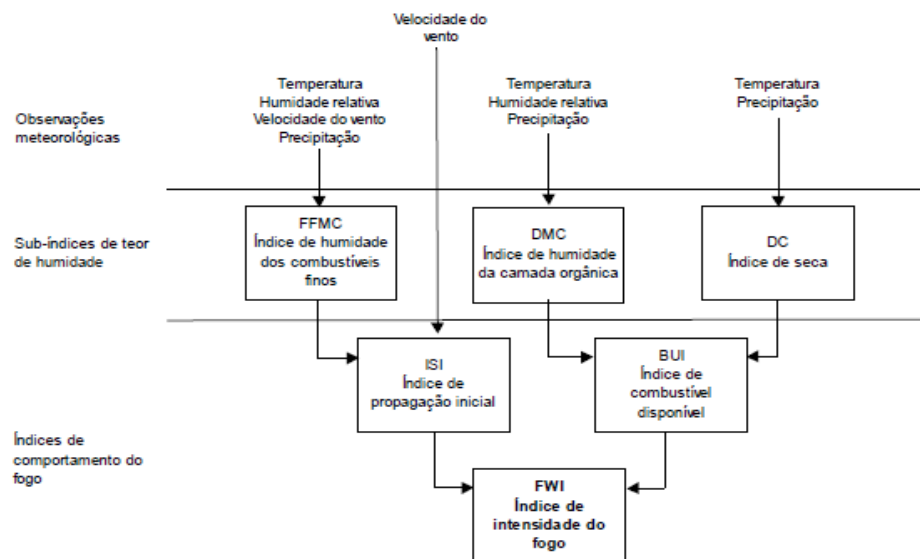


Figura 2- Estrutura do índice meteorológico de perigo de incêndio.

b) Dados de modelo FWI e índices derivados

Para o presente trabalho, utilizou-se valores do FWI calculado através da combinação multimodelo, ou seja, a média multimodelo é o FWI médio calculado a partir de todas as projeções do GCM (Global Climate Models, ver Tabela 3 na seção 3.3). A resolução temporal do índice é diária e estão disponíveis dados desde 1986 até 2100, no entanto optou-se por dividir os mesmos para um período de referência, compreendido de 1986-2005, e dois períodos futuros, 2046-2065 (meados do século) e 2081-2100 (final do século), em detrimento do objetivo do presente estudo. A classificação do índice, para análise, é feita de acordo com o Sistema Europeu de Informação sobre Incêndios Florestais (EFFIS), do Copernicus Emergency Management Service (EMS), como representado na Tabela 2. Na análise dos valores de FWI considera-se que quanto maior o valor do índice, mais favorável são as condições meteorológicas para deflagrar um incêndio florestal. Os valores no meio de cada classe (15,30,45), foram selecionados para estabelecer a classe de perigo de incêndio como moderado, alto e muito alto (NOA/Anna Karali, 2019).

Tabela 2- Classes do FWI de acordo com EFFIS (European Forest Fire Information System).

Classes de perigo de incêndio	FWI
Muito baixo	< 5.2
Baixo	5.2-11.2
Moderado	11.2-21.3
Elevado	21.3-38.0
Muito Elevado	38.0-50.0
Extremo	>= 50.0

c) nDays

Para além do FWI diário para o período de tempo escolhido, utilizou-se a variável nDays, que representa o número de dias, para o período de tempo escolhido, por ano, com perigo de incêndio moderado, alto e muito alto de acordo com a classificação do Sistema Europeu de Informação sobre Incêndios Florestais (EFFIS) para o domínio europeu. Assim, considera-se que o número de dias com risco moderado corresponde a valores de FWI superiores a 15, o número de dias com risco elevado corresponde a valores de FWI superiores a 30 e número de dias com risco muito elevado corresponde a valores de FWI superiores a 45.

3.2.2.1. Descrever os Modelos Climáticos

Os modelos climáticos numéricos utilizam-se para realizar projeções sobre a possível evolução futura do sistema climático. Eles são contruídos com base em descrições matemáticas dos processos físicos que governam o sistema climático (momento, massa e conservação da energia). A simulação numérica consiste em resolver no tempo e no espaço um sistema de

equações que representam as leis fundamentais da física da atmosfera, sendo que as soluções são obtidas com base em algoritmos numéricos. Os modelos de circulação geral (GCMs) são modelos climáticos numéricos globais que são usados para estudar as mudanças climáticas em escala global, em que descrevem as interações entre os componentes do sistema climático global. Os modelos climáticos regionais (RCM) têm maior resolução, dado que são um modelo numérico de previsão do clima para uma região, determinados a partir de GCM (para definição de condições iniciais e condições-fronteira). Assim, os modelos regionais forçados por modelos globais de clima, permitem resolver os processos físicos em escalas mais pequenas e, consequentemente, com maior detalhe (EURO-CORDEX Guidelines).

O conjunto de dados utilizado apresenta projeções de indicadores de perigo de incêndio para a Europa com base no Sistema Canadense de Índice Meteorológico de Incêndio (FWI) sob condições climáticas futuras, disponibilizadas pelo Copernicus Climate Change Service (C3S). Os dados foram obtidos através de projeções futuras do FWI projetadas no âmbito da iniciativa EURO-CORDEX, que derivam da saída de dados com uma resolução temporal de 3-horas e resolução espacial de $0.11^\circ \times 0.11^\circ$, tendo sido utilizado o valor correspondente ao meio dia local. As simulações foram realizadas através do Modelo Regional Climático RCA4 (Rossby Centre regional atmospheric model) impulsionado por seis GCMs (Global Climate Models) globais diferentes, ICHEC-EC-EARTH, MPI-M-MPI-ESM-LR, MOHC-HadGEM2-ES, CNRM-CERFACS-CNRM-CM5, IPSL-IPSL-CM5A-MR, NCC-NorESM1-M, esquematizado na Tabela 3.

O EC-Earth foi desenvolvido como parte de um consórcio europeu, da qual ICHEC e Met Eireann são membros, promovendo a cooperação internacional, o acesso ao conhecimento e uma ampla base de dados, sendo o principal objetivo desenvolver e aplicar um modelo do sistema terrestre baseado no sistema de previsão sazonal do ECMWF para fornecer informações climáticas confiáveis aos serviços climáticos. O mesmo tem sido utilizado em muitos projetos europeus e tendo uma contribuição significativa para o CMIP5 e CMIP6 (site EC-Earth). O EC-EARTH, representa bem os principais padrões de variabilidade climática, embora considere temperaturas de superfície mais frias (Hazeleger et al., 2012). O modelo MPI-ESM-LR é um dos modelos participantes no *Coupled Model Intercomparison Project Phase 6* (CMIP6) e consiste nos modelos de circulação geral para a atmosfera ECHAM6 e para o oceano MPIOM (Jungclaus et al., 2013). O estudo de Le Pichon et al., 2015 concluiu que o MPI-ESM-LR e EC-EARTH apresentam resultados concordantes, relativamente ao vento e temperatura. O MOHC-HadGEM2-ES foi projetado com objetivo de simular e compreender a evolução do clima numa escala temporal centenária, incluindo feedbacks biogeoquímicos. O modelo consegue representar um estado realista do clima, vegetação e biologia, provando o desempenho do mesmo, contudo ainda existem algumas áreas onde existe uma amplificação dos defeitos, como por exemplo, a sob previsão de vegetação em algumas regiões áridas. O modelo tem provado ser uma ferramenta útil para prever o clima futuro, bem como, entender os feedbacks climáticos dentro do sistema terrestre (Collins et al., 2011). De acordo com alguns estudos, os três modelos subestimam a precipitação, representando uma versão um pouco mais seca e quente do clima real (Ayugi et al., 2020). O modelo CNRM-CM5 faz parte do projeto CMIP5, em que os componentes que compõem o mesmo permitem reproduzir o estado médio do clima atual e a variabilidade climática em escalas de tempo de meses a séculos. Contudo, o mesmo também apresenta algumas falhas, em que uma delas tem que ver com precipitação significativa em muitas regiões (Voltaire et al., 2012). O modelo IPSL-IPSL-CM5A-MR desenvolvido no Instituto Pierre Simon Laplace (IPSL), contribuindo para o CMIP5, caracteriza-se por ser um modelo climático clássico que agrupa um modelo atmosfera e superfície terrestre a um modelo oceano e gelo marinho. Este modelo inclui um ciclo de carbono interativo, uma representação dos

processos químicos que ocorrem na troposfera e estratosfera e uma representação que abrange os aerossóis, e por isso mesmo, considera-se um sistema terrestre, visto que representa os principais processos dinâmicos, físicos e biogeoquímicos que representam o sistema climático. No estudo de Dufresne et al., 2013, os autores apresentaram o modelo IPSL-CM5 e testaram as diferentes parametrizações do mesmo, consideram que a representação dos processos físicos atmosféricos no modelo é utilizada para influenciar fortemente a variabilidade do clima simulado, tanto a magnitude como o padrão das alterações climáticas projetadas. Por fim, o modelo NCC-NorESM1-M desenvolvido no Centro Climático Norueguês é um sistema de modelo acoplado para o sistema climático físico e tem por base o CCSM4, Modelo de Sistema Comunitário versão 4 da Corporação Universitária para Pesquisa atmosférica. No entanto, apesar de ter por base o CCSM4 o NorESM1-M difere deste, visto que, o modelo oceânico é substituído por uma versão modificada do MICOM e a componente atmosférica inclui as interações químicas dos aerossóis considerando os seus efeitos nas nuvens através a interface radiação-aerossol-nuvem (Iversen et al., 2013).

De acordo com Kjellström et al., 2016, o RCA4 é útil para auxiliar a criação de informações climáticas fundamentais, neste caso, incêndios. As simulações dos modelos para o período futuro, neste caso 2046-2065 (Futuro 1) e 2081-2100 (Futuro 2), são realizadas tendo por base três cenários diferentes RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5. Todos estes cenários estão associados a uma maior concentração de CO₂ na atmosfera até 2100 relativamente ao presente, devido ao aumento contínuo das emissões deste gás na atmosfera (Rovithakis et al., 2022). O cenário RCP2.6 é um cenário de emissão otimista em que as emissões atingem o pico e diminuição após 2020, o cenário RCP4.5 é um cenário de mudança climática de médio alcance que considera uma estabilização nos forçamentos radiativos após 2100 e, por fim, o cenário RCP8.5 é um cenário de mudança climática de alto nível em que considera aumento do forçamento radiativo até 2100 (Rovithakis et al., 2022). Neste estudo apenas utilizou-se o cenário RCP8.5.

Tabela 3- GCM/RCM par e cenário climático utilizado para produzir os valores de FWI derivados das simulações climáticas. Note: RCP = Representative Concentration Pathway.

GCM/RCM par	GCM instituição	RCM instituição	Cenário
ICHEC-EC-EARTH/RCA4	Earth Climate Simulations- Irlanda		
MPI-M-MPI-ESM-LR/RCA4	Max Planck Institute for Meteorology (MPI-M)- Alemanha		
MOHC-HadGEM2-ES/RCA4	MetOffice Hadley Centre (MOHC)-UK	Rosby Centre regional atmospheric model- RCA4	RCP8.5
CNRM-CERFACS-CNRM-CM5/RCA4	Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) and Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS)- France		
IPSL-IPSL-CM5A-MR/RCA4	Institut Pierre Simon Laplace- France		
NCC-NorESM1-M/RCA4	Norwegian Climate Centre (NCC)—Norway		

3.3. Metodologia

3.3.1. Análise das condições médias da atmosfera durante incêndios

Este estudo tem como objetivo perceber que condições atmosféricas são responsáveis por originar grandes incêndios florestais em Portugal, e consequentemente, o que podemos esperar para os próximos anos. Assim, para dar resposta ao objetivo proposto, começou-se por realizar sob a forma de figuras, recorrendo ao software MATLAB, as condições médias para os índices e variáveis meteorológicas dos 89 incêndios reportados num período histórico, 2000-2019, caracterizando em termos médios que condições atmosféricas propiciam a ocorrência de incêndios florestais.

3.3.2. Análise dos dados climáticos

É importante explicar que, relativamente aos dados de FWI provenientes dos modelos climáticos, durante o processo de download dos dados surgiu um aviso na plataforma em que estes dados estavam subestimados para o período futuro 2081-2100, e, portanto, era necessário tomar uma decisão, ou fazia novamente o download dos dados desde o princípio ou então continuava com os mesmos, optando por não representar o futuro 2081-2100. Assim, como já não havia tempo para reiniciar todo o processo de download decidi apenas representar para o período histórico (1986-2005) e período futuro (2046-2065).

Numa segunda fase, com objetivo de dar resposta ao segundo objetivo do presente trabalho, utilizou-se os dados de FWI obtidos através dos modelos descritos anteriormente, que fazem parte do CMIP5, em que se optou por dividir os dados em diferentes períodos temporais, um período histórico de 1981-2000 com objetivo de posteriormente comparar os resultados obtidos com os dados de FWI provenientes de reanálises com os dados obtidos através de modelos, analisando o grau de confiança dos modelos e quão bem se aproximam, ou não, da realidade. Para o futuro dividiu-se em dois períodos, 2046-2065 (meados do século) e 2081-2100 (final do século), com objetivo de obter informações do que poderemos esperar no futuro relativamente aos valores do FWI. Assim sendo, dividiu-se os dados dos modelos em pastas, após realização de download através do site Copernicus, visto que tínhamos seis modelos e os dados não se encontravam divididos por modelos. De seguida, com o auxílio do software MATLAB, desenvolveu-se um código para que fosse possível juntar todos os valores de FWI e da variável nDays de cada ano do respetivo modelo, representando sob a forma de figura os valores médios e máximos do FWI para cada modelo. Por fim, realizou-se um ENSAMBLE dos seis modelos dado que quando nos referimos a modelos é sempre mais correto representar sob a forma de ensemble, em que o mesmo representa a média das médias para cada modelo.

A última fase do trabalho consistiu em procurar, para um dos períodos futuros, um episódio futuro em que se observe uma sequência de dias com risco extremo de incêndio, ou seja, valores superiores a 38 (Fernandes, 2019). O ano escolhido foi o ano de 2055. Na metodologia, efetuou-se um código em que para cada um dos períodos futuros procurou-se quantos episódios se registam para um valor de $FWI > 38$, guardando esses índices para posteriormente analisar e comparar com as condições atmosféricas que propiciaram esses valores. Assim, observou-se que no ano 2055 existiam muitos valores registados (apresentados na Tabela que se encontra nos anexos) e analisou-se cada um dos episódios separadamente, selecionando um dos

episódios registados e representou-se sob a forma de figura o período selecionado. A partir daí, com objetivo de dar resposta ao último objetivo do trabalho, no site do Copernicus fez-se o download das variáveis meteorológicas para o período de tempo escolhido, temperatura a 2 metros, precipitação, componente zonal e meridional do vento a 10 metros, que foram obtidos através do modelo global MPI-M-MPI-ESM-LR e modelo regional RCA4, desenvolvidos no âmbito do Experimento do Programa Climático Regional Coordenado de escala regional (CORDEX). Os dados têm uma resolução espacial de $0.11^{\circ} \times 0.11^{\circ}$.

4. Resultados e Discussão

4.1. Condições médias em incêndios históricos

A previsão de condições atmosféricas que propiciam a deflagração de um incêndio florestal é extremamente difícil. A utilização de índices é frequentemente utilizada por especialistas, com objetivo de fornecer previsões relativamente às condições atmosféricas. Assim, é importante estudar quais as características da atmosfera durante um incêndio florestal, e portanto, nesta secção iremos analisar alguns índices de estabilidade e algumas variáveis meteorológicas correspondentes a incêndios históricos ocorridos no passado.

4.1.1. Variáveis meteorológicas

A temperatura, a humidade atmosférica, a precipitação e o vento são variáveis de grande importância para os meteorologistas, dado que estas têm forte impacto sobre as atividades humanas. As figuras seguintes representam o resultado gráfico sob a forma de figuras dos valores médios diários da temperatura a 2 metros de altitude, figura 3. a), da humidade relativa, figura 3. b), da precipitação total, figura 3.c) e do vento horizontal a 10 metros de altitude, figura 3.d). Para a temperatura, figura 3.a), observa-se que os valores médios mais elevados se registam na região sul e interior de Portugal, 24-28°C, coincidentes com as zonas onde precipitação total é mais baixa. A região Norte e Centro de Portugal são caracterizadas por temperaturas médias menores. A Humidade Relativa, figura 3.b), é em média mais elevada nas zonas litorais, 80-90%, em que existe uma grande influência do oceano. Nas zonas interiores, os valores médios da humidade relativa são muito baixos, 0-40%, e em algumas regiões são de aproximadamente 0%, zonas estas que se caracterizam por um clima muito seco. A precipitação total média é praticamente inexistente sobre todo o território, com valores de aproximadamente 0 mm/h. O vento horizontal, figura 3.d), apresenta valores médios elevados no litoral, 6 – 7 m/s. Em geral, a região sul apresenta valores médios do vento baixos, 2 – 3 m/s. É ainda possível verificar que a direção do vento é predominantemente do quadrante NW no litoral e na parte continental, principalmente na região sul observa-se fluxo de leste, proveniente do Mediterrâneo.

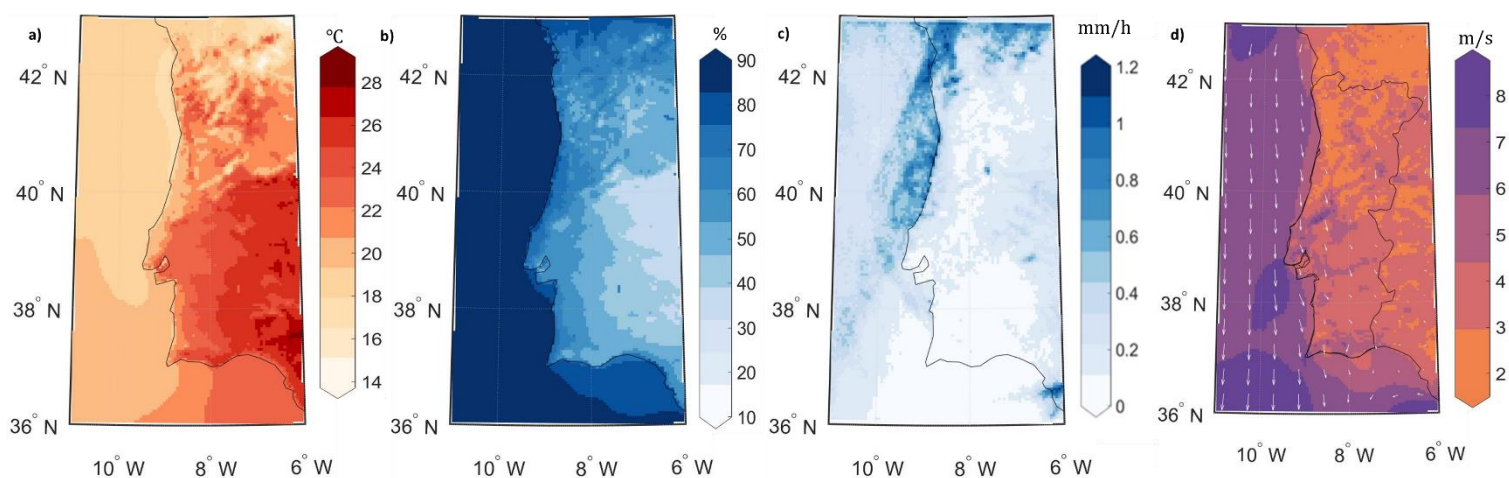


Figura 3- Representação espacial dos valores médios diários da a) temperatura a 2 metros de altitude; b) humidade relativa; c) precipitação total; d) vento horizontal a 10 metros de altitude.

4.1.2. Índice HAINES e HDW

A estabilidade atmosférica desempenha um papel importante no comportamento do fogo, e por isso, o índice HAINES (HI) é utilizado como um indicador que permita avaliar o potencial risco de incêndio na atmosfera, e consequentemente, o potencial de crescimento de incêndios rurais, com base no gradiente de temperatura e da temperatura do ponto de orvalho, em que valores elevados do índice correspondem a alto potencial para ocorrer um incêndio e valores baixos a um potencial reduzido de ocorrência de incêndio (Park 2018). O índice The Hot-Dry-Windy (HDW) é utilizado para analisar os efeitos de um incêndio na atmosfera com base em variáveis meteorológicas, humidade relativa, temperatura e vento, excluindo informações sobre topografia e combustíveis (Srock et al.,2018).

A Figura 4 representa a média diária dos índices (a) HAINES e (b) HDW para os 89 incêndios históricos ocorridos no período 2000-2019. A partir da análise da figura 4.a), observa-se que os valores máximos localizam-se no interior de Portugal, 8°- 6°W de longitude, com o valor de 5-6, e os valores mínimos no litoral, 10°- 9°W de longitude, de aproximadamente 4. Na figura 4.b) é possível verificar que os valores máximos, 550 – 600 hPa m s⁻¹, localizam-se no interior de Portugal, 8°-6°W de longitude embora numa banda de latitude mais extensa, 39°-40°N de latitude. Os valores mínimos, 150 – 200 hPa m s⁻¹, observam-se na região Norte e mais junto ao litoral, 11°-9°W de longitude e 42°-43°N de latitude.

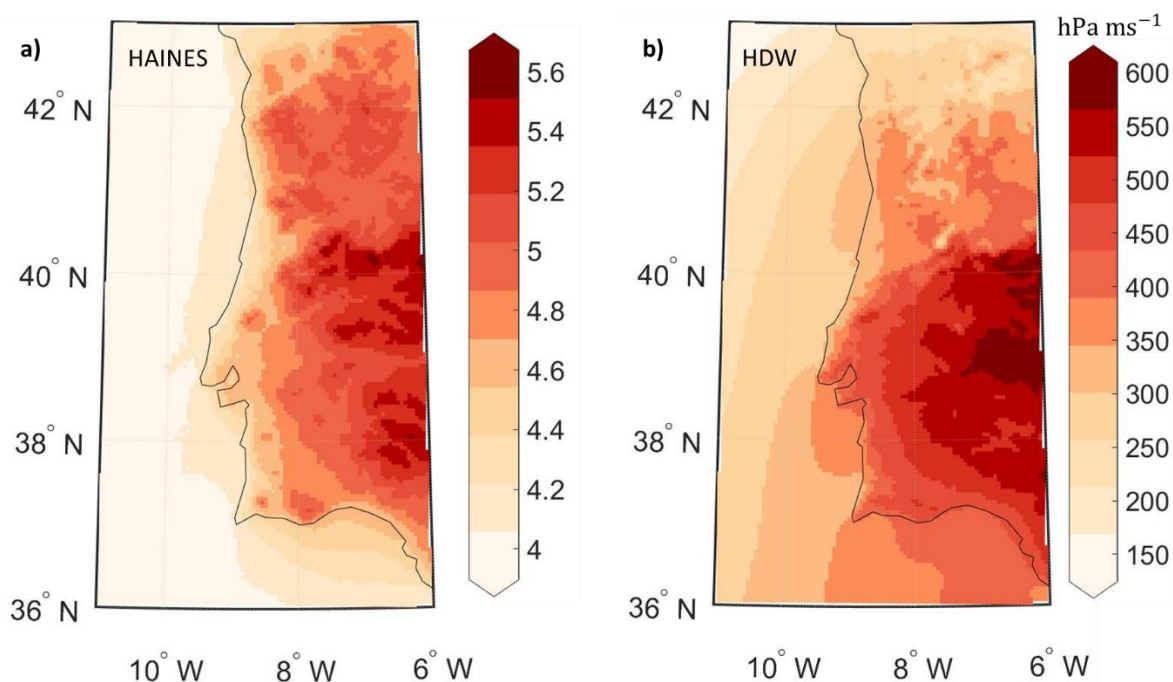


Figura 4- Representação espacial do média diária dos índices a) HAINES; b) HDW.

4.1.3. Índices de Estabilidade

Os índices de estabilidade fornecem um valor que nos dá o potencial de ocorrência de tempo severo num dado local, visto que, estimam a probabilidade de ocorrência de uma tempestade dando informação acerca da intensidade e duração da mesma. Estes avaliam a existência de convecção húmida profunda que propicia o desenvolvimento de ambientes favoráveis à

formação de tempestades, e, portanto, são definidos através de variáveis termodinâmicas, temperatura e pressão.

O índice CAPE, Energia Potencial disponível para convecção, define-se como a energia potencial disponível para convecção e o CIN corresponde à quantidade de energia necessária para impedir a ascensão de uma parcela de ar, denominado de Inibição de Convecção. Assim, definem-se dois níveis o LCL, Nível de Condensação Ascendente e o LFC, Nível de Convecção Livre. O LCL é definido como o nível em que a temperatura da parcela atinge a sua temperatura do ponto de orvalho, tornando-se saturada. Este nível geralmente define a base da nuvem. O LFC, é definido como o nível em que a parcela continua a ascender, no caso de a atmosfera ser instável e a parcela continuar a subir, até à altitude onde a temperatura da parcela é igual à temperatura ambiente.

A figura 5 revela o resultado gráfico dos valores médios diários para o (a) Nível de Condensação Ascendente (LCL), (b) Nível de Convecção Livre (LFC), (c) índice CAPE e (d) índice CIN. Analisando conjuntamente as figuras observa-se que, para a figura 5.a) a região interior, entre os 39°-40°W de latitude e 7°-8°W de longitude, apresenta os valores mais elevados do LCL, 3200 – 3400 m. Enquanto que os valores mais baixos localizam-se nas regiões mais próximas ao mar e região norte, 1400 – 1600 m. Para o LFC, figura 5.b), verificam-se que os valores médios mínimos, 0.9×10^4 - 1.0×10^4 m, localizam-se mais a sudeste, 8-6°W de longitude e 36-37°N de latitude. Os valores máximos localizam-se no litoral, 1.4×10^4 m. Para o índice CIN, figura 5.c), deverá ter-se em conta as figuras 5.a) e b), visto que o mesmo é dado em função do valor do índice LCL e LFC. Assim, verifica-se que os menores valores, 100 – 300 J/Kg, localizam-se na banda de latitude 38°-41°N e os valores mais elevados, 500 – 600 J/Kg, na banda de latitude 36°-38°N. Tendo em conta a definição do índice, valores baixos significam potencial instabilidade, ou seja, convecção vertical. Estas regiões coincidem, principalmente, com as zonas mais interiores de Portugal. A figura 5.d) representa o resultado gráfico do índice CAPE. Analisando conjuntamente a figura 5.c) e d), percebe-se que os valores mais elevados coincidem com os menores valores do índice CIN (figura 5.c)), na ordem de 350 – 450 J/Kg, estendendo-se numa maior banda de latitude, 36°-42°N, mas menor banda de longitude, 9°-6°W. Assim, verifica-se que as zonas mais interiores são caracterizadas por valores de CIN baixos e CAPE altos.

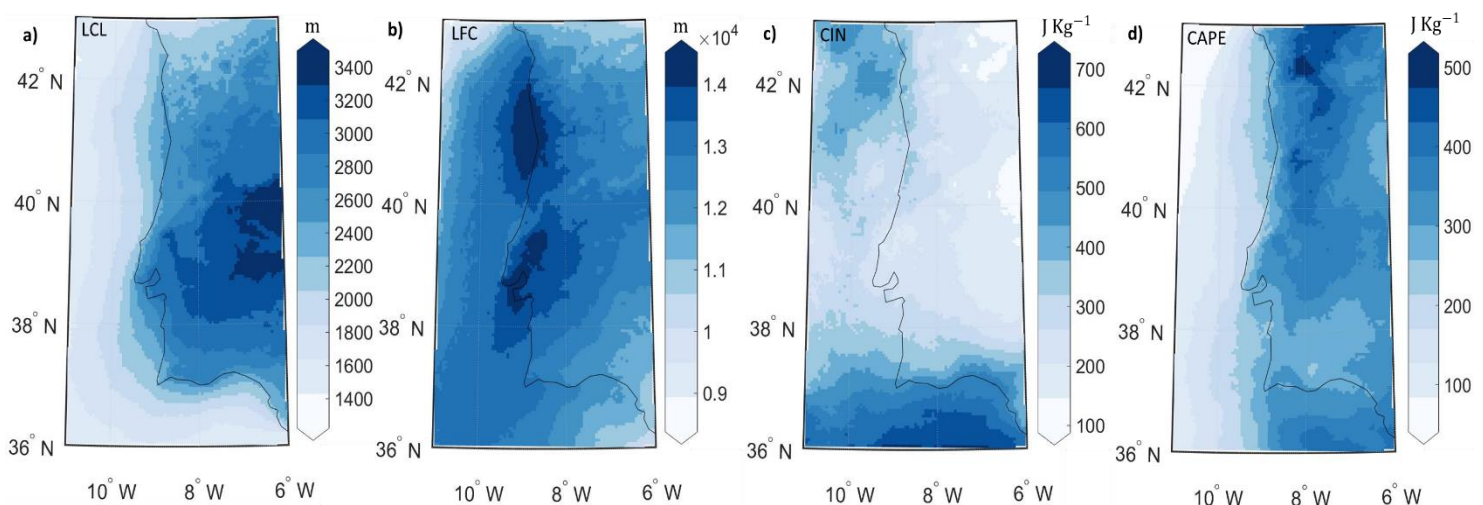


Figura 5- Representação espacial da média diária do a) LCL; b) LFC; c) índice CIN; d) índice CAPE.

Para além dos índices anteriores temos ainda a altura da camada limite planetária representada na figura seguinte. Podemos observar que os valores máximos da altura da camada limite planetária, 700 – 800 m, localizam-se nas zonas mais interiores, 38°-40°N de latitude, e 8°-6°W de longitude. Nas zonas mais litorais, registam-se valores médios menores, 100 – 200 m.

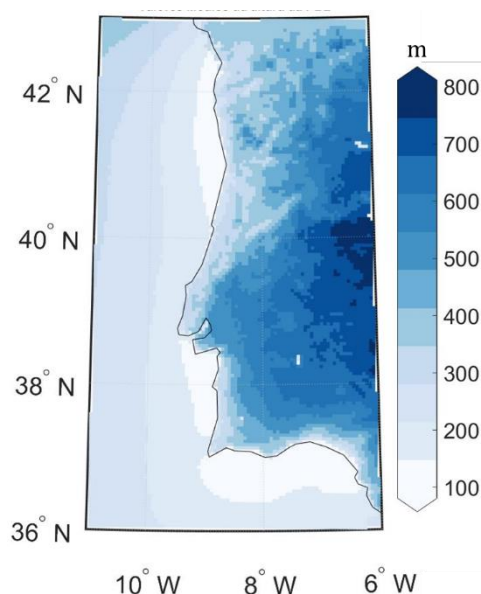


Figura 6- Representação espacial da média diária da altitude da camada limite planetária.

4.2. FWI histórico e futuro

Nesta secção pretende-se avaliar as diferenças existentes nos valores de FWI obtidos pelos modelos, analisar os valores máximos diários de FWI para o período histórico, 1986-2005, e para um futuro próximo, 2046-2065, com objetivo de determinar as áreas com maior risco de incêndio. Pretende-se ainda analisar, através da variável ndays, descrita na secção 3.2.3, quais as projeções futuras para o risco de incêndio com base no número de dias com risco moderado, elevado e muito elevado.

4.2.1. Validação do Ensemble

Numa primeira fase, começou-se por validar os dados do ensemble mean para o período histórico através da comparação com as reanálises para o mesmo período de tempo. Para isso, através da plataforma Copernicus desenvolvida pelo Centro Europeu de Previsão a Médio Prazo (ECMWF), utilizou-se os dados de FWI disponíveis para dois tipos de dados, a média do ensemble multimodelo com uma resolução espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ e dados de FWI das reanálises ERA5 com uma resolução espacial de $0.25^\circ \times 0.25^\circ$. Efetuamos uma comparação visual, dado que, as malhas tinham uma resolução diferente. Assim, a partir da análise da figura 7, podemos concluir, que o ensemble mean representa de forma fidedigna o campo das reanálises, e, portanto,

poderá ser utilizado como boa representação do período histórico, dado que as áreas em que os valores baixos, moderados e elevados aparecem coincidem aproximadamente.

O objetivo de se comparar dados provenientes de reanálises e dados sob a forma de ensemble para o mesmo período é pelo facto de as reanálises apresentarem resultados mais fidedignos dado que são feitas a partir de dados de estações meteorológicas e satélites.

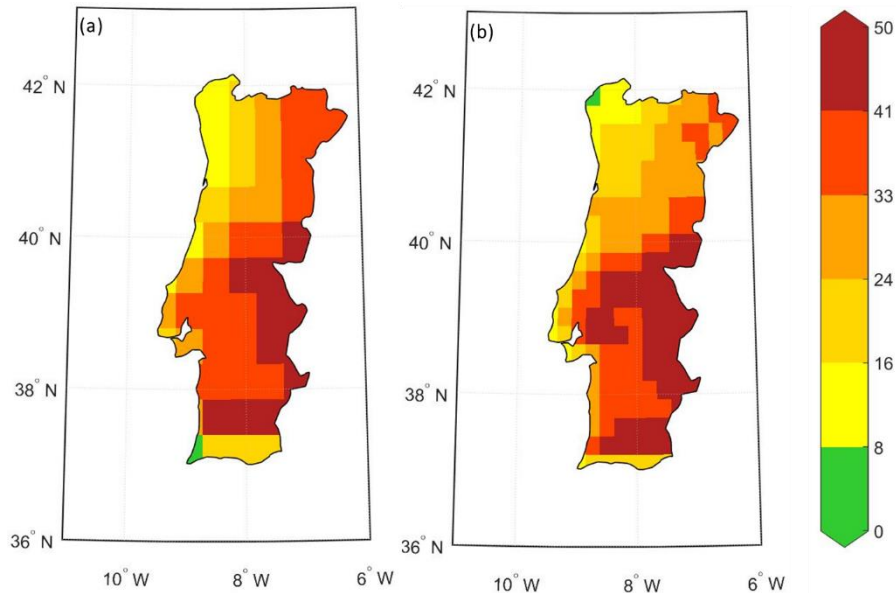


Figura 7- Representação do FWI para o mês de julho de 2021 através de (a) ensemble Mean, (b) Reanálises.

4.2.2. Máximos Diários FWI

Como referido no Capítulo 3 o índice FWI reflete o impacto das variáveis meteorológicas na humidade dos combustíveis presentes no solo florestal, e é utilizado com objetivo de se estimar o perigo de incêndio em escalas de tempo diárias e mensais.

Inicialmente, começou-se por calcular os máximos diários do FWI para o período de referência (1986-2005) e para o período futuro (2046-2065), para cada modelo, representando sob a forma de figuras (figura 8).

A Figura 8 representa os máximos diários do FWI para o período de referência (1986-2005) calculado para cada um dos modelos. A partir da análise da figura observa-se que, em ambos os modelos os valores mais elevados registam-se na região interior centro e sul, 9°-7.5°W de longitude e 37.5°-40°N de latitude, com valores máximos de FWI que variam entre 60-75. O litoral e a região norte apresentam máximos diários menores, 0-15 no litoral e 15-60 na região norte. Analisando conjuntamente as figuras para cada um dos modelos verifica-se que, os resultados obtidos através do modelo MPI (figura 8. e)) apresentam valores máximos mais elevados, 75-90, na região sul (distrito de Beja). Enquanto que o modelo NCC (figura 8.f)) mostra uma área menor em que se observam valores máximos mais elevados, apenas a região interior sul regista valores máximos de FWI maiores (60-75) e, também, identificam-se valores máximos menores na região Norte, identificada pela cor amarela (15-30).

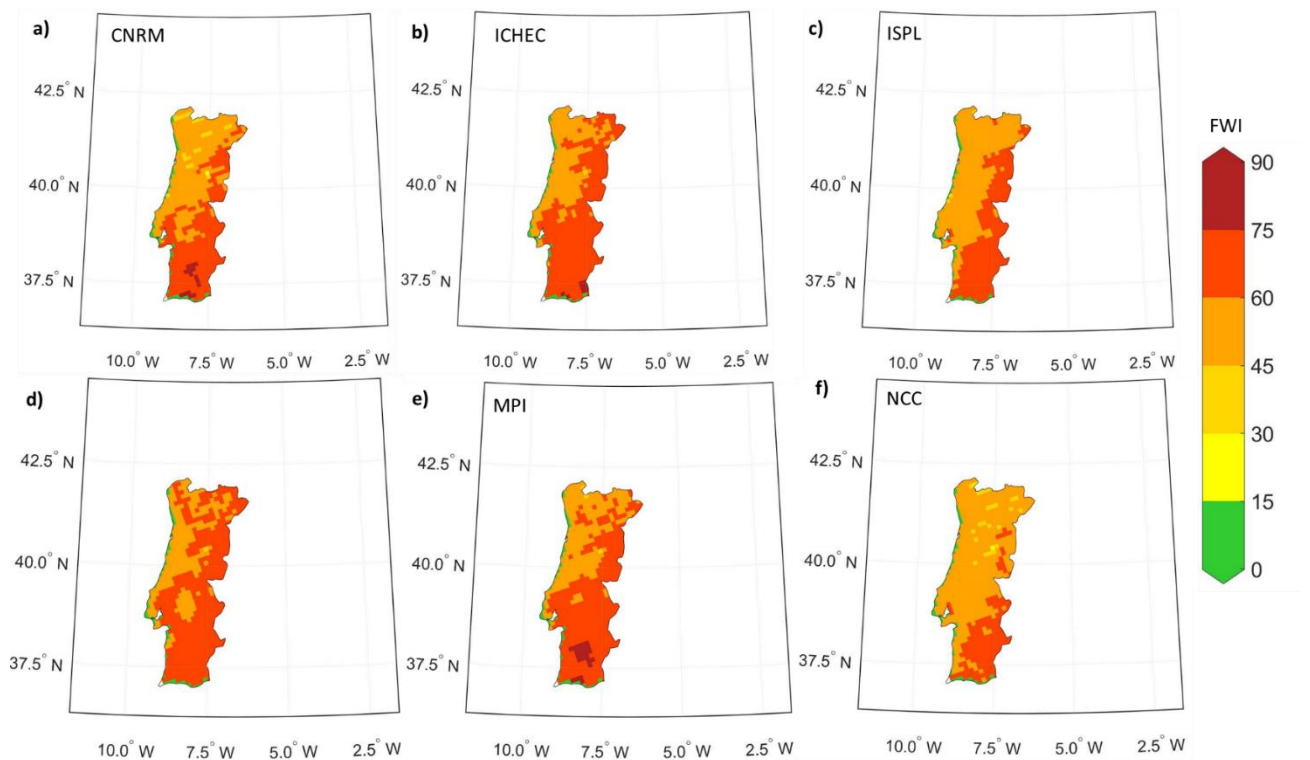


Figura 8- Representação espacial dos máximos diários do FWI para o período de referência (1986-2005) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.

A Figura seguinte representa o resultado gráfico dos valores máximos diários do FWI para o período futuro (2046-2065) para cada um dos modelos. Analisando a figura verifica-se que, à semelhança dos resultados anteriores, o modelo NCC (figura 9.f) dá-nos uma projeção futura com valores máximos menores, comparativamente aos restantes modelos, visto que não se registam valores máximos superiores a 75 e a área em que estes se encontram é menor, no interior e sul de Portugal, correspondente à cor vermelha. Enquanto que o modelo MOHC (figura 9.d)), apresenta resultados mais drásticos, onde praticamente todo o território, com exceção do litoral, regista valores máximos de FWI a variar entre 60-75 (cor vermelha) e 75-90 no interior sul (cor encarnada).

Se analisarmos conjuntamente as figuras 8 e 9, podemos concluir que os valores máximos diários do FWI apresentam uma tendência geral de aumento em número e em área. A região do interior sul e centro (Beja, Évora, Portalegre, Castelo Branco e Guarda) são as que registam os valores máximos diários mais elevados, correspondente à cor vermelha, 60-75, e cor encarnada, 75-90. A região do norte, que no período de referência não apresentava valores superiores a 75 (cor encarnada), no período futuro 2046-2065 passa a registar valores máximos diários superiores a 75 e os valores máximos que anteriormente se registavam numa área menor, correspondente a 60-75 (cor vermelha) surgem em quase todo o território, como apresentado nas figuras 9. b), c), d), e). Os resultados obtidos com os modelos CNRM (figura 9.a) e modelo NCC (figura 9.f)) apresentam valores máximos diários maiores (cor vermelha), apenas na região sul e centro, figura. a), e na região sul e interior centro, modelo NCC, figura 9.f).

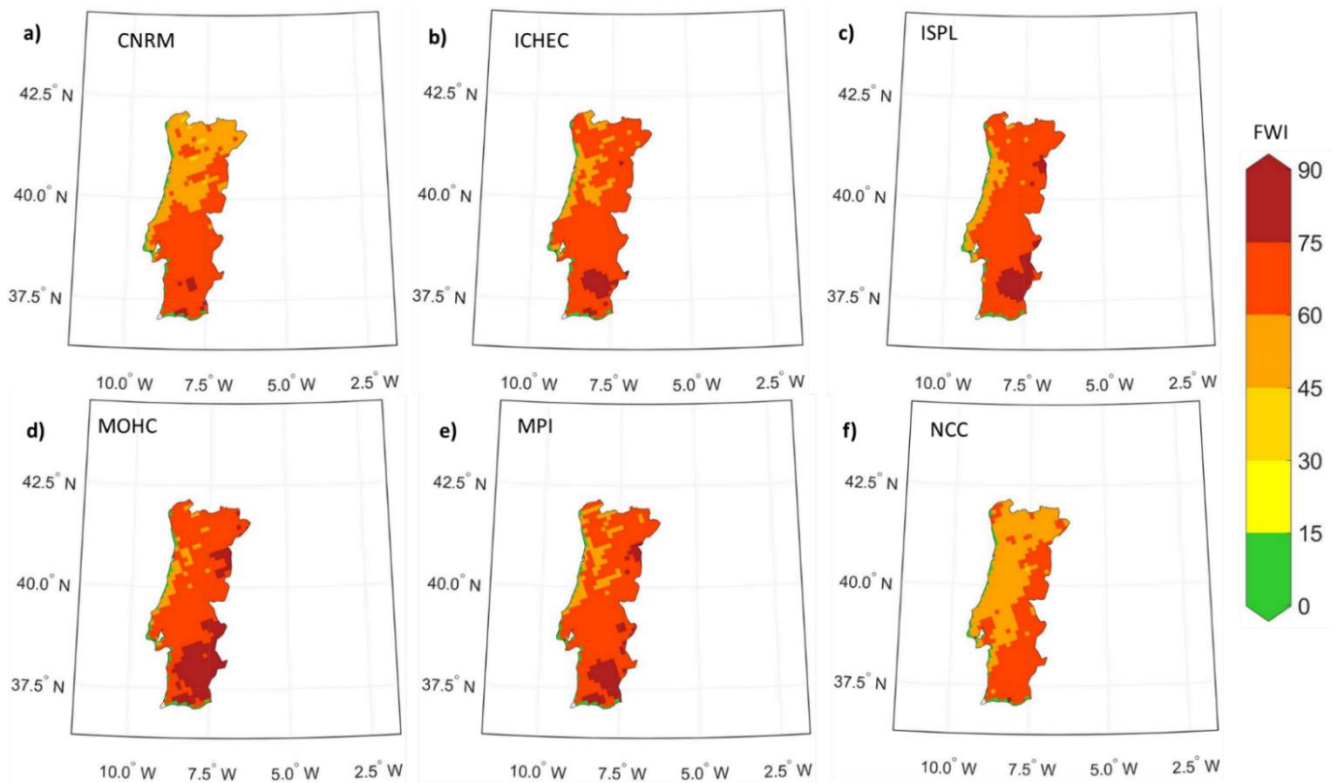


Figura 9– Representação espacial dos máximos diários do FWI para o período futuro (2046-2065) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.

Podemos concluir que, como seria de esperar, a região do interior e sul e alguns distritos do centro, apresentam um risco maior para a ocorrência de incêndio florestal, como resultado de se registarem os valores máximos mais elevados nestas áreas, Beja, Évora, Portalegre, Castelo Branco, Guarda, Viseu, Santarém, Bragança, dado que nestas regiões a quantidade de precipitação é muito baixa e registam-se temperaturas elevadas, como foi possível observar na secção 4.1.1. Para além de que, o tipo de vegetação presente em algumas destas regiões (Castelo Branco e Viseu) é maioritariamente pinheiro bravo (*Pinus pinaster* Ait.), sendo mais propenso à deflagração de incêndios florestais, de acordo com a bibliografia descrita no Capítulo 2, o distrito de Santarém caracteriza-se por áreas florestais constituídas por eucaliptos, que também favorecem a deflagração de incêndios florestais. As projeções futuras sugerem que, os valores máximos diários de FWI irão aumentar em número e em área, como resultado do aumento da temperatura resultante das alterações climáticas.

4.2.3. Ensemble Histórico e Futuro

Após calcular os valores máximos diários do FWI para cada um dos modelos, representou-se os valores médios mensais do FWI multi-modelo sob a forma de ensemble, para o período histórico (figura 10.b) e período futuro (2046-2065) (figura 10.c)). De seguida, comparou-se os resultados obtidos para o ensemble mean (descrito na secção 4.2.1) para o período histórico (1986-2005) com os resultados obtidos através da média multi-modelo sob a forma de ensemble a partir dos modelos climáticos. O objetivo principal realizar uma análise comparativa entre

ambos, e, posteriormente inferir sobre os resultados futuros, com maior confiança, visto que os resultados obtidos com os dados provenientes de reanálises são semelhantes aos resultados obtidos com o ensemble mean.

Contudo, é importante referir que a resolução espacial dos dados ensemble mean é de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ e a resolução espacial dos modelos é de $0.11^\circ \times 0.11^\circ$, ou seja, a resolução dos modelos é muito maior representando, assim, com maior detalhe os valores de FWI.

Analisando primeiramente, os valores de FWI médios diários obtidos a partir de dados ensemble mean para o período histórico (1986-2005) (figura 10. a)) é possível ver que, a região sul e interior centro de Portugal, 9° - 7.5° W de longitude e 37.5° - 40° N de latitude, são as regiões que apresentam maior risco de incêndio, em que os valores médios de FWI variam entre 12-20 (cor alaranjada mais escura e vermelho). A região Norte, 9° - 7.5° W de longitude e 41° - 42° N de latitude, é a que apresenta menor risco de incêndio, com valores médios de FWI que variam entre 0-12 (cor verde, amarelo e laranja claro), juntamente com o litoral e costa algarvia. É de notar que apenas o litoral norte (Viana do Castelo) apresenta risco de incêndio muito baixo, correspondendo a valores médios de FWI a variar entre 0-4 (cor verde).

Para o ensemble multi-modelo, para o período histórico de 1986-2005 (figura 10.b)) é possível verificar que, a região norte, litoral e costa algarvia são as regiões que apresentam risco mais baixo de incêndio, com valores médios de FWI a variar de 0-8 (cor verde e amarela). O risco de incêndio é maior no interior sul e região sul de Portugal, 8° - 7.7° W de longitude e 37° - 38° N de latitude, com valores médios de FWI a variar entre 12-20 (cor laranja escuro e vermelho). A região centro, 9.5° - 7.5° W de longitude e 38.5° - 41° N de latitude, apresenta risco médio de incêndio com valores médios de FWI a variar e entre 4-12 (cor amarela e laranja claro).

Para o ensemble multi-modelo, para o período futuro de 2046-2065 (figura 10.c)) podemos observar que, a região norte, litoral e costa algarvia são as regiões que apresentam risco mais baixo de incêndio, com valores médios de FWI a variar de 0-8 (cor verde e amarela). O risco de incêndio é maior no interior sul e região sul de Portugal, 8° - 7.7° W de longitude e 37° - 38.5° N de latitude, com valores médios de FWI a variar entre 16-25 (cor vermelha e encarnado). A região centro, 9.5° - 7.5° W de longitude e 38.5° - 41° N de latitude, apresenta risco médio de incêndio com valores médios de FWI a variar e entre 8-16 (cor amarela e laranja claro).

Analisando conjuntamente as figuras é possível verificar que a região do interior sul e sul de Portugal são as áreas em que se verificam valores médios de FWI maiores, ou seja, risco elevado de incêndio. Contudo existem algumas diferenças entre os três gráficos, em que se observarmos os gráficos da figura 10.b) e c), conclui-se que o risco de incêndio aumenta em geral em quase todo o território, em que é possível verificar que as regiões em que se identificavam risco baixo de incêndio, ou seja, valores médios de FWI a variar entre 0-4 (cor verde), diminuem em área, concentrando-se apenas no litoral e algumas cidades no norte. A restante área do norte que no período histórico (1986-2005) (figura 10.b)) apresentava valores médios de FWI a variar entre 4-8 (cor amarela) aumentam o risco de incêndio, com valores médios de FWI a variar entre 4-12 (cor amarela e cor laranja claro). Na região sul e interior sul de Portugal o risco de incêndio também aumenta, em que passamos de valores médios de FWI a variar entre 12-20 (cor laranja escuro e vermelho) para valores médios a variar entre 12-25 (vermelho e encarnado). A região do centro também aumenta o risco de incêndio em que os valores médios de FWI apresentavam valores a variar entre 4-12 (cor amarela e laranja) no período histórico e passam a variar entre 8-16 (cor laranja e laranja escuro) no período futuro. Relativamente aos resultados obtidos com o ensemble mean 1986-2005 verifica-se que os mesmos não apresentam grande detalhe, devido

à resolução espacial, contudo é possível observar que entre a figura 10.a) e b) as áreas onde se concentram os valores médios mais elevados e menores coincidem aproximadamente, mas os valores médios de FWI mais elevados obtidos através das reanálises são maiores, 16-20, comparativamente aos resultados obtidos com o ensemble para o mesmo período (figura 10.b)) e distribuem-se numa área maior, região centro e sul de Portugal.

Concluindo, observa-se um gradiente espacial acentuado de Norte para Sul, cor verde para cor encarnada, em que passamos de risco de incêndio baixo (valores médios de FWI 0-4) para risco de incêndio elevado (valores médios de FWI 20-25).

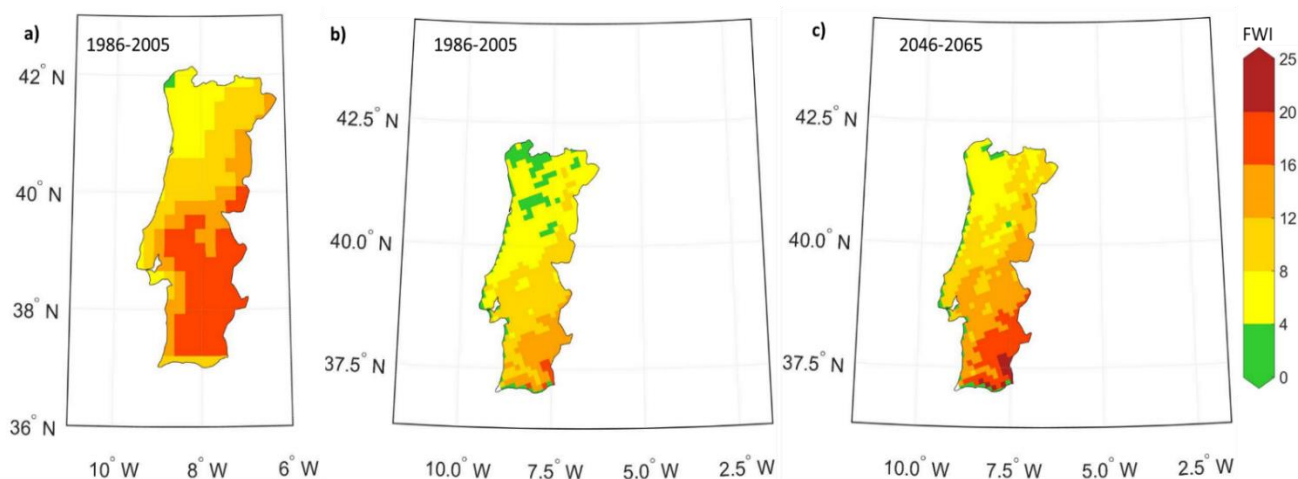


Figura 10- Representação espacial dos valores médios diários do FWI a) a partir de dados de ensemble mean para período de referência (1986-2005); b) a partir do ensemble multi-modelo para período de referência (1986-2005); c) a partir do ensemble multi-modelo para período futuro (2046-2065).

De seguida fez-se a diferença entre o ensemble multi-modelo do período histórico (figura 10.b)) e período futuro (figura 10.c)), com objetivo de se observar como variou do período histórico para o período futuro o risco de incêndio, com base nos valores médios de FWI obtidos pelos seis modelos.

Através da visualização da figura 11 identifica-se, à semelhança da análise anterior, três regiões, a primeira diz respeito ao litoral e norte de Portugal em que a diferença existente entre o período histórico e o período futuro não é muito acentuada, onde é aproximadamente nula no litoral (cor branca), de seguida na região do norte mais junto ao litoral, 8.5°-7.5°W de longitude e 40°-42.5°N de latitude, é de aproximadamente 2 (bege). Posteriormente identifica-se a região do centro e interior norte e centro de Portugal em que existe um ligeiro aumento, 3-4 (cor creme). Por fim, regista-se a região em que o aumento do período histórico para o período futuro é mais acentuado que diz respeito à região sul e interior sul de Portugal, mais concretamente Faro, Beja, Évora e Portalegre, com valores de aumento na ordem de 5-6 (cor encarnada). Importa referir que não existe nenhuma zona em que se observe diminuição do risco de incêndio, ou seja, valores negativos (tons azuis).

Concluindo, à semelhança da análise feita anteriormente, identifica-se que existe um gradiente espacial de Norte para Sul, cor creme para cor encarnada, em que passamos de zonas que o risco de incêndio aumentou ligeiramente (cor creme) para zonas em que o aumento é acentuado (cor encarnada).

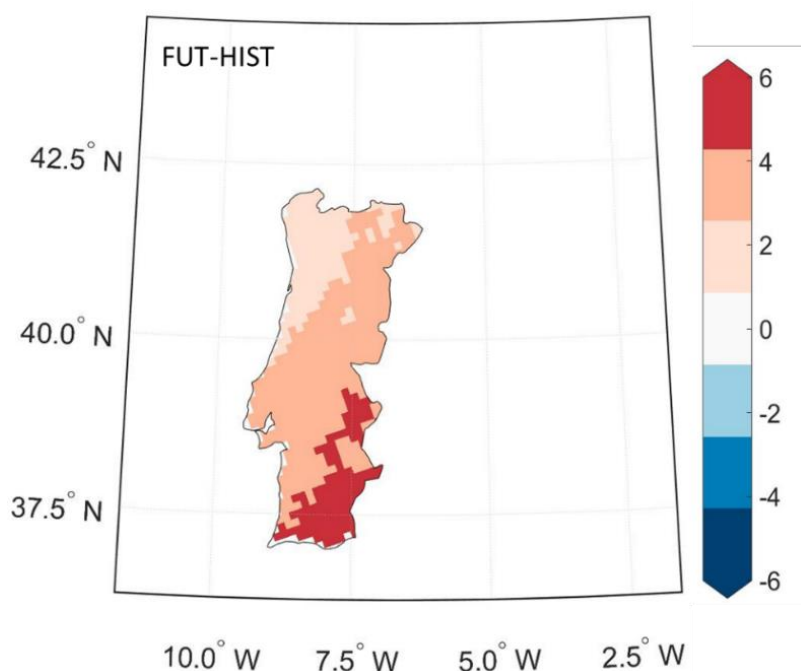


Figura 11- Representação espacial da diferença entre o ensemble multi-modelo para período futuro (2046-2065) e o período de referência (1986-2005).

4.2.4. Variável ndays

Nesta secção serão apresentados sob a forma de figuras os valores médios da variável ndays, que corresponde ao número de dias com risco moderado, valores de FWI superiores a 15, elevado, corresponde a valores de FWI superiores a 30, e muito elevado de incêndio, corresponde a valores de FWI superiores a 45, para o período de referência (1986-2005), período futuro (2046-2065) e para o período futuro (2081-2100), obtidos através dos modelos. O objetivo nesta secção é de analisar como varia o risco de incêndio do período histórico para o período futuro e em que zonas ocorrem essas variações, ou seja, determinar as áreas que no futuro apresentam maior potencial para a deflagração de um incêndio florestal. Pretende-se também analisar os resultados obtidos entre modelos, realizando uma análise comparativa entre eles.

4.2.4.1. Número de dias com risco moderado

As figuras seguintes, 12, 13 e 14, representam os valores médios para o período histórico (1986-2005) (figura 12), futuro próximo (2046-2065) (figura 13) e para período futuro (2081-2100) (figura 14) do número de dias com risco moderado de incêndio calculado para cada um dos modelos, como identificado nas respetivas legendas.

Numa primeira análise, podemos observar que para todos os modelos existe um gradiente espacial acentuado de Norte para Sul, que varia em número e em área nos três períodos de

tempo analisados. No período de referência, figura 12, temos a norte variações de 40 a 80 dias, cor amarelo, que a sul são de 120 a 160 dias (cor laranja escuro) (figura 12.a, d) e e)) e de 160-200 dias (cor vermelha) (figura 12.b), c) e f)). Para o futuro próximo (2046-2065) (Figura 13), passaremos a ter variações de 40-80 dias (cor amarela) (figura 13.a)), 80-120 dias (cor laranja) (figura 13.b) e f)), 120-160 dias (cor laranja escuro) (figura 13.c) e d)), a norte, para passar a ter a sul um número médio de dias que varia entre 160-200 dias (cor laranja vermelha) (figura 13.a), ,b), d), e) e f)), 200-240 dias (cor encarnada) (figura 13.c)). Para o final do século, 2081-2100 (figura 14), é possível observar que a variação de valores é em média a mesma, contudo a extensão da área aumenta. Por exemplo, observa-se que maior parte do território passa a ter variações de 160-200 dias com risco moderado de incêndio, figura 14.c), d) e f), e, portanto, o gradiente que existia deixa de ser tão acentuado, comparativamente ao período de referência.

Sabendo que uma estação de ano tem aproximadamente 90 dias de duração, podemos concluir que algumas zonas do território português se encontram mais de metade do ano com risco moderado de incêndio, mais concretamente a região sul e interior centro e sul. Se analisarmos conjuntamente as figuras 12, 13 e 14 podemos concluir que o número de dias com risco moderado de incêndio aumentará no futuro em número e em área.

Relativamente às diferenças entre modelos, temos que, os resultados obtidos através do modelo ISPL, figura 12, 13 e 14.c), apresentam resultados em que o número de dias com risco moderado é maior em número e em área, onde no período histórico (figura 12.c)), na região sul e interior centro e sul, 9°-8°W de longitude e 37.5°-41°N de latitude, cor vermelha, no período de 2046-2065, figura 13.c), a área estende-se até algumas regiões do interior centro e norte (Guarda e Braga) e para o período 2081-2100, figura 14.c), essa área aumenta ligeiramente, passando a região toda do interior norte a estar em média 160-200 dias com risco moderado de incêndio.

Enquanto que os resultados obtidos através do modelo CNRM, figura 12, 13 e 14.a), apresentam resultados em que o número de dias com risco moderado é menor, por exemplo, na região sul temos uma variação entre 80-160 (tons alaranjados) e na região norte temos uma variação de 0-80 dias com risco moderado (cor verde e amarelo) para o período histórico (figura 12.a)). Para o período futuro 2046-2065, figura 13.a), temos uma variação a norte de 40-80 dias e a Sul 120-160 dias, em média. Enquanto que no período 2081-2100, figura 14.a), temos variações de 80-120 dias a norte e a sul 160-200 dias, em média.

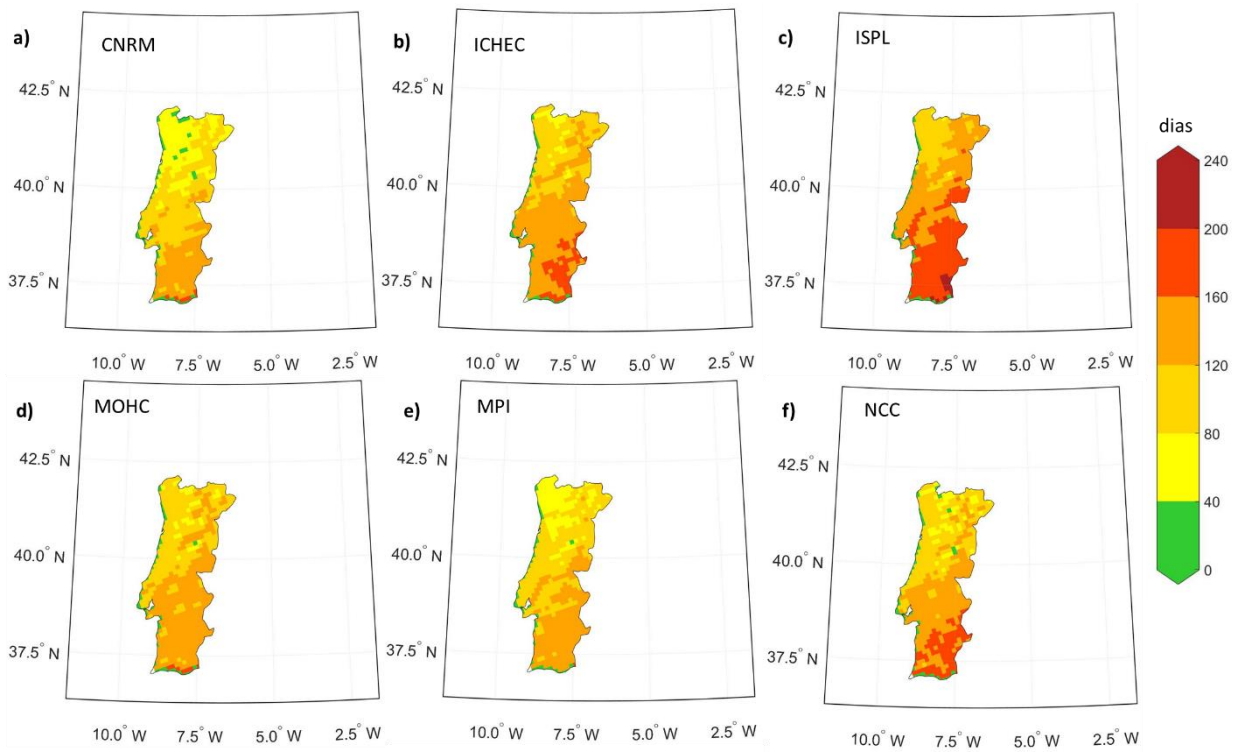


Figura 12- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco moderado de incêndio para o período histórico (1986-2005) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.

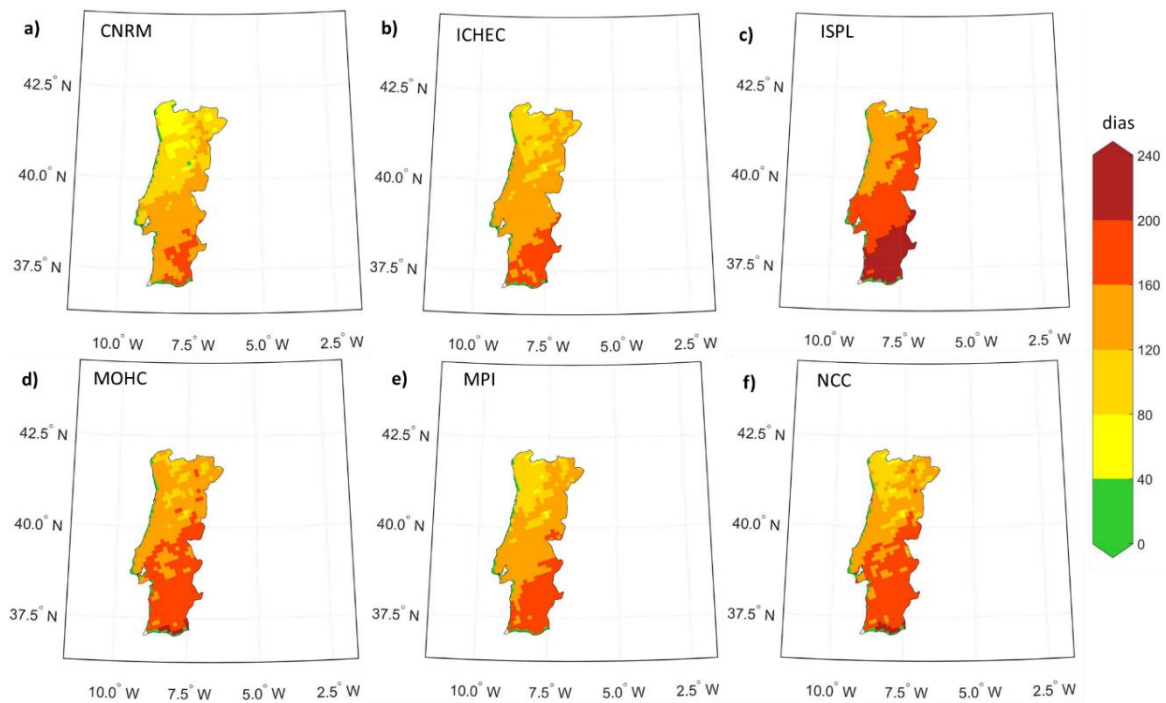


Figura 13- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco moderado de incêndio para o período futuro (2046-2065) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.

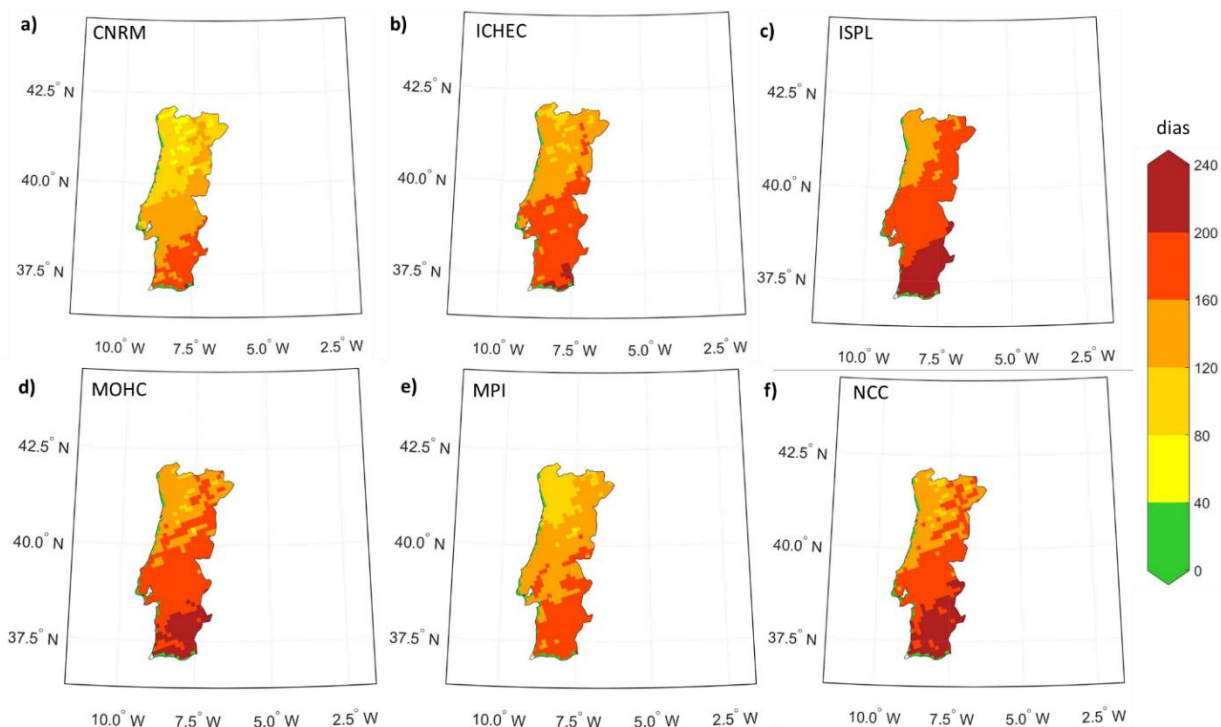


Figura 14- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco moderado de incêndio para o período futuro (2081-2100) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.

4.2.4.2. Número de dias com risco elevado

De seguida estão representadas as figuras com os valores médios para o período histórico (1986-2005), figura 15, para o período de 2046-2065, figura 16, e para o período futuro de 2081-2100, figura 17, do número de dias com risco elevado de incêndio, ou seja, valores de FWI superiores a 30, calculado para cada um dos modelos, como identificado na legenda.

Seguindo a mesma análise adotada anteriormente é possível ver que, em todos os modelos existe um gradiente acentuado espacial de Norte para Sul, que se torna menos acentuado no período futuro 2081-2100, figura 17. No período histórico, figura 15, temos variações a norte que variam entre 0-25 dias (cor verde) (figura 15.a)), 25-50 (cor amarela) (figura 15.b), d), e f)) e 50-75 (cor laranja) (figura 15.c)), e a sul passamos a ter variações de 75-100 dias (cor laranja escuro) (figura 15.a)), 100-125 (cor vermelha) (figura 15.b), d), e f)) e 125-150 (cor encarnada) (figura 15.c)). No período futuro 2046-2065, figura 16, a norte os valores variam entre 25-50 dias (cor amarelo) (figura 16.a)), 50-75 (cor laranja) (figura 16.b), e) e f)) e 75-100 (laranja escuro) (figura 16.c) e d)), enquanto que a sul observam-se variações entre 100-125 (vermelho) (figura 16.a)) e 125-150 (encarnado) (figura 16.b), c), d), f) e e)). No final do século, 2081-2100 (figura 17), mantém-se a mesma variação, no entanto, o gradiente é menos acentuado dado que o tamanho da área onde se atinge uma variação média de 125-150 dias (cor encarnada) aumenta, em que passamos a ter região sul e em alguns modelos região centro com um número elevado de dias com risco elevado de incêndio.

Relativamente às diferenças entre os resultados apresentados por ambos os modelos, tal como acontecia anteriormente, os resultados obtidos através do modelo ISPL, figura 15, 16 e 17.c), apresentam o maior número de dias com risco elevado em número e em área. Para o período histórico (figura 15.c)) variam entre 100-125 dias e 125-150 (cor vermelha e encarnada) e ocorrem na região centro e sul de Portugal. No período futuro, 2046-2065, figura 16.c), essa área estende-se para a região norte com um número médio de dias a variar entre 100-125 e 125-150 dias (cor vermelha, encarnada) e no final do século praticamente todo o território, com exceção do litoral, encontra-se em média 100 a 150 dias por ano com risco elevado de incêndio, ou seja, valores de FWI superiores a 30.

Enquanto que os resultados obtidos através do modelo CNRM, figuras 15, 16 e 17.a) apresentam resultados menos drásticos, em que o número de dias com risco elevado é menor quando comparado com o modelo ISPL. Se analisarmos cada um dos períodos, temos que: no período histórico, figura 15.a), a norte registavam-se variações em média de 0-25 dias (cor verde) e a sul 75-100 (tons alaranjados), com risco elevado de incêndio; no período futuro 2046-2065, figura 16.a), a norte, em média, cerca de 25-50 dias (cor amarela) por ano encontravam-se sob risco elevado de incêndio e a sul cerca de 100-125 dias (cor vermelha); no final do século, 2081-2100, figura 17.a), a norte tínhamos, em média, 50-75 dias (cor laranja) e a sul 100-125 dias (cor vermelha), com risco elevado de incêndio.

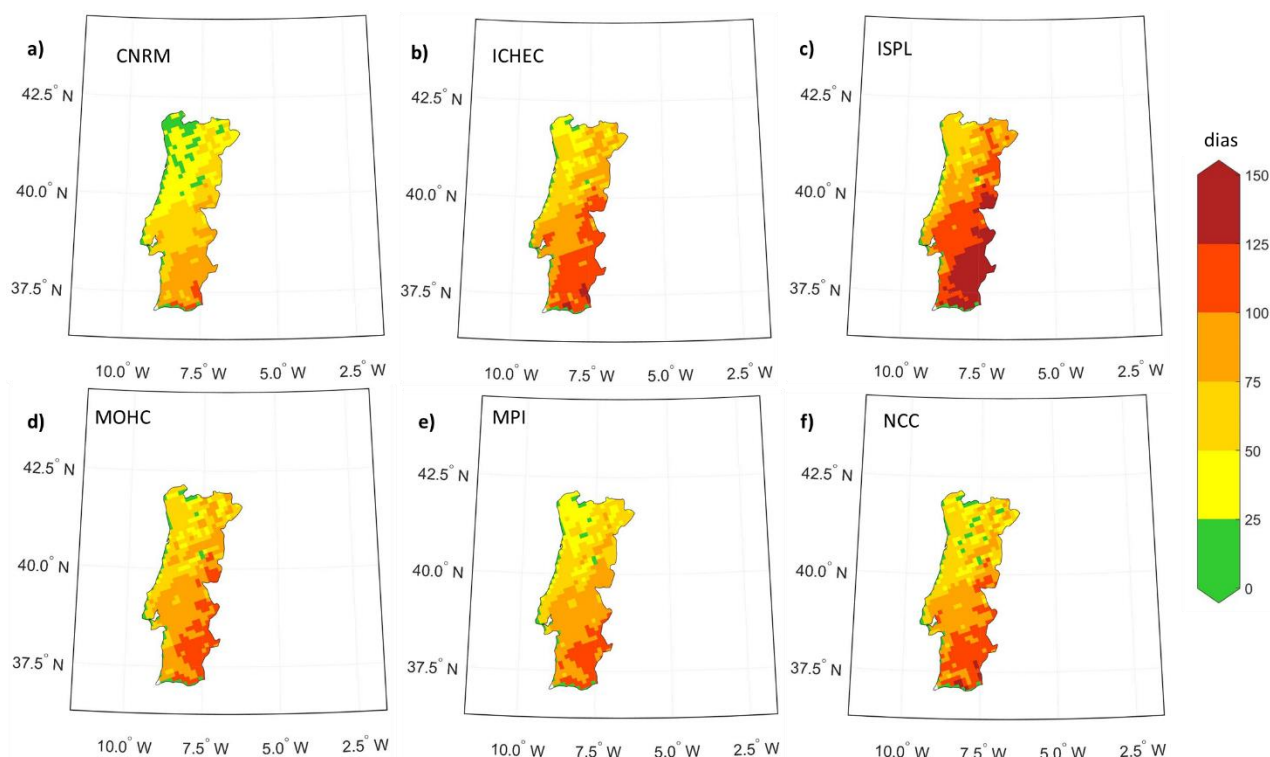


Figura 15- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco elevado de incêndio para o período histórico (1986-2005) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.

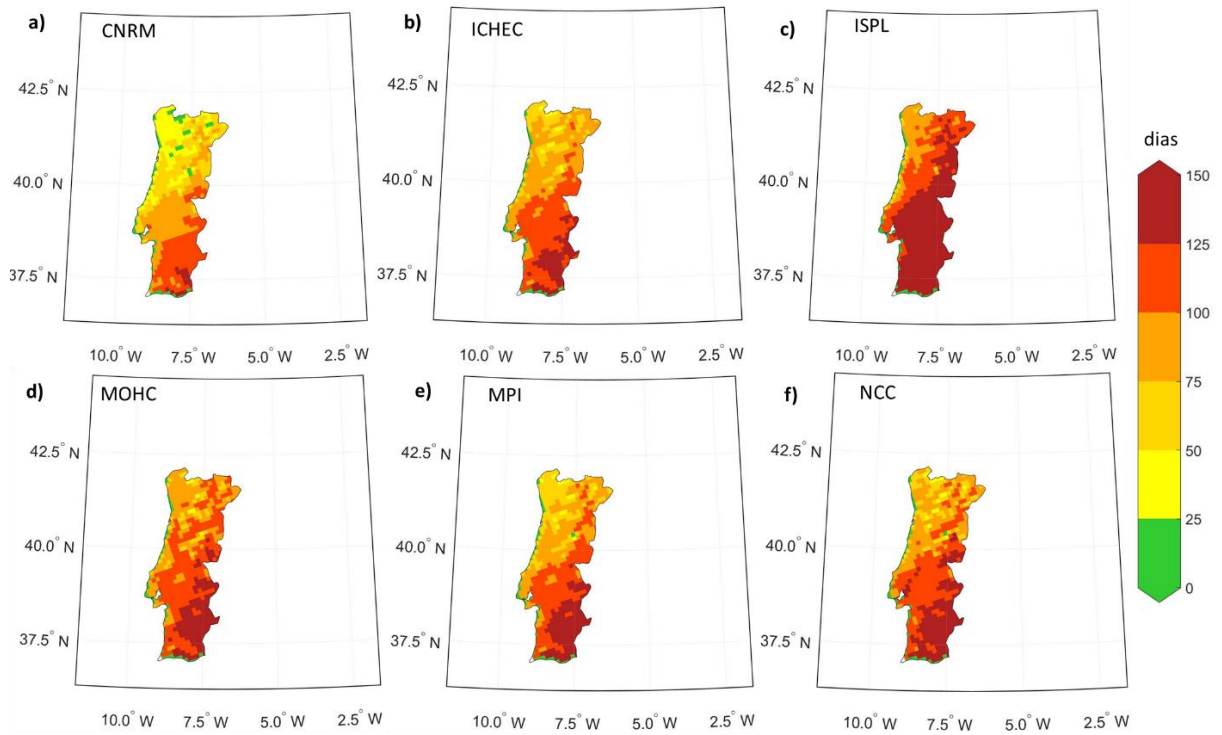


Figura 16- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco elevado de incêndio para o período futuro (2046-2065) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.

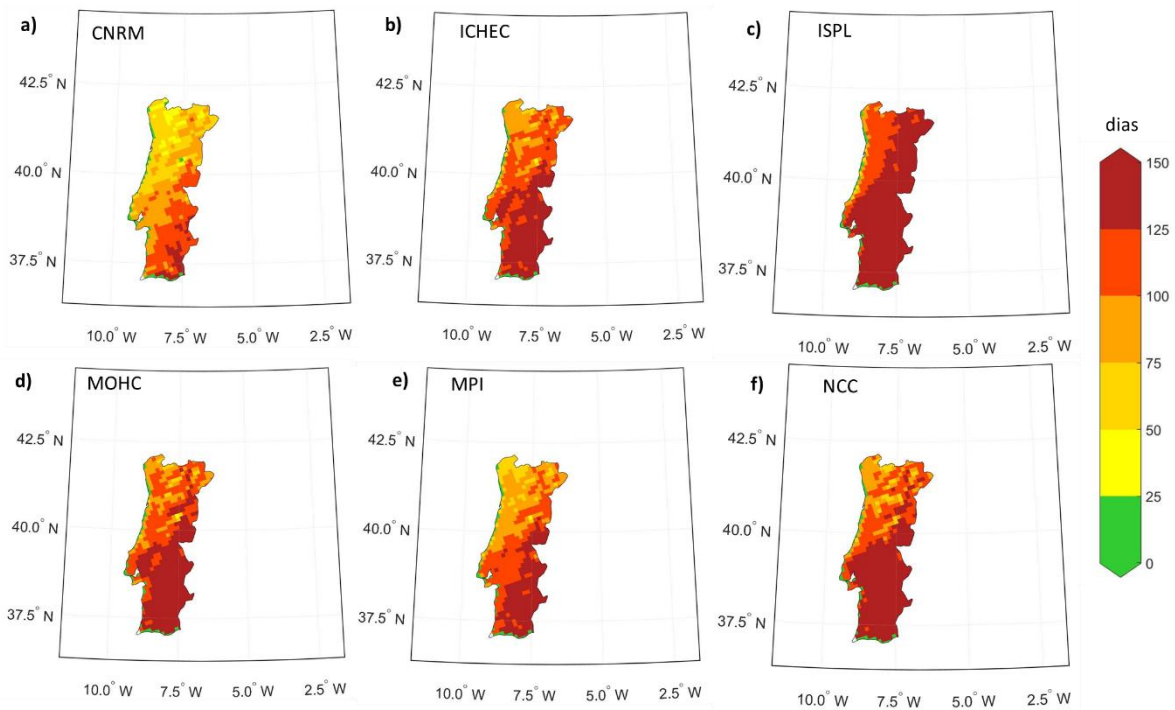


Figura 17- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco elevado de incêndio para o período futuro (2081-2100) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.

4.2.4.3. Número de dias com risco muito elevado

Por último, encontra-se representado nas figuras seguintes os resultados obtidos para o número de dias com risco muito elevado, ou seja, valores de FWI superiores a 45, para os três períodos de tempo considerados e para cada um dos modelos.

Na figura 18 estão representados os resultados obtidos para o período histórico, 1986-2005. A partir da análise da figura podemos identificar que existe, à semelhança das outras figuras, um gradiente acentuado de norte-sul, onde em média podemos ver que a norte registam-se variações, em média, de 0-15 dias (cor verde) e a sul variações de 45-60 dias (cor laranja escuro) (figura 18.a), d), e f)) e 60-75 dias (cor vermelha) (figura 18.b) e c)), com risco muito elevado de incêndio.

Na figura 19 apresentam-se os resultados obtidos para o período futuro de 2046-2065, onde podemos identificar um gradiente acentuado do litoral para o interior e de norte para sul, mudando um pouco o padrão espacial observado nas figuras anteriores. Assim, a norte o número de dias varia em média entre 0-15 dias (cor verde) (figura 19.a)), 15-30 dias (cor amarela) (figura 19.e) e f)) e 30-45 dias (cor laranja claro) (figura 19.b), c) e d)), a sul o número de dias com risco muito elevado varia, em média, entre, 60-75 dias (cor vermelha) (figura 19.a), b), d), f)) e 75-90 dias (cor encarnada) (figura c) e e)). No litoral o número de dias com risco muito elevado varia em média entre 0-15 dias (cor verde), enquanto que, no interior o número de dias aumenta, em que varia, em média, entre 46-70 dias (cor laranja escuro) (figura 19.a)), 60-75 dias (cor vermelha) (figura 19.b), d), e) e f)) e 75-90 dias (cor encarnada) (figura 19.c)).

No final do século, figura 20, passamos a ter claramente um gradiente espacial oeste-leste, visto que praticamente o interior centro e sul, e algumas regiões do interior norte apresentam um número muito elevado de dias com risco muito elevado de incêndio (cor encarnada) e as regiões do litoral, dada a proximidade ao oceano, apresentam um número médio de dias com risco muito elevado menor, embora ainda seja significativo e deve ser visto com algum cuidado. Ou seja, existe uma variação do padrão espacial observado para as figuras anteriores, número de dias com risco moderado e elevado.

O maior número de dias com risco muito elevado no interior de Portugal é obtido através do modelo ISPL em ambos os períodos, figuras 18, 19 e 20.c), onde se regista em média 60-75 dias com risco muito elevado nesta região, no período histórico (figura 18.c)), 75-90 dias para o período futuro 2046-2065 (figura 19.c)) e o mesmo número de dias para o período 2081-2100 que se estende numa área maior. Considerando que uma estação do ano tem uma duração de 90 dias, podemos concluir que praticamente toda a região interior centro e sul, num futuro próximo, passará a estar o verão todo sob risco muito elevado de incêndio.

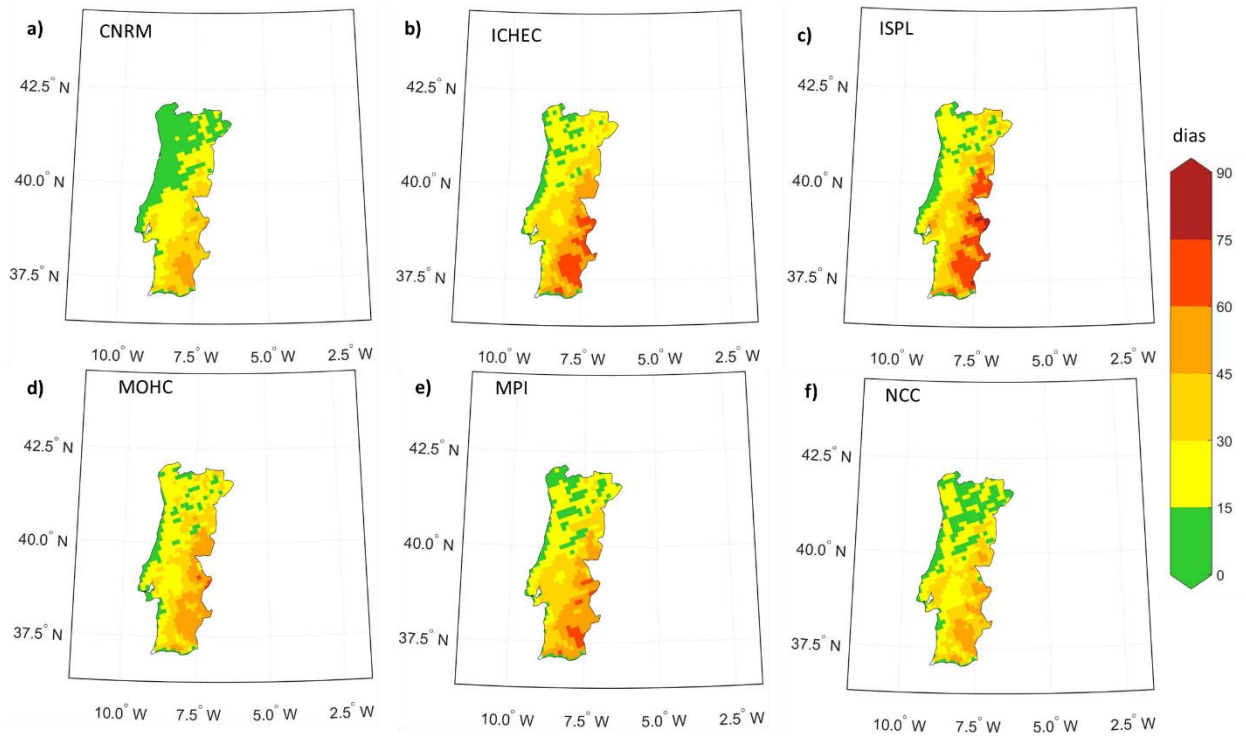


Figura 18- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco muito elevado de incêndio para o período histórico (1986-2005) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.

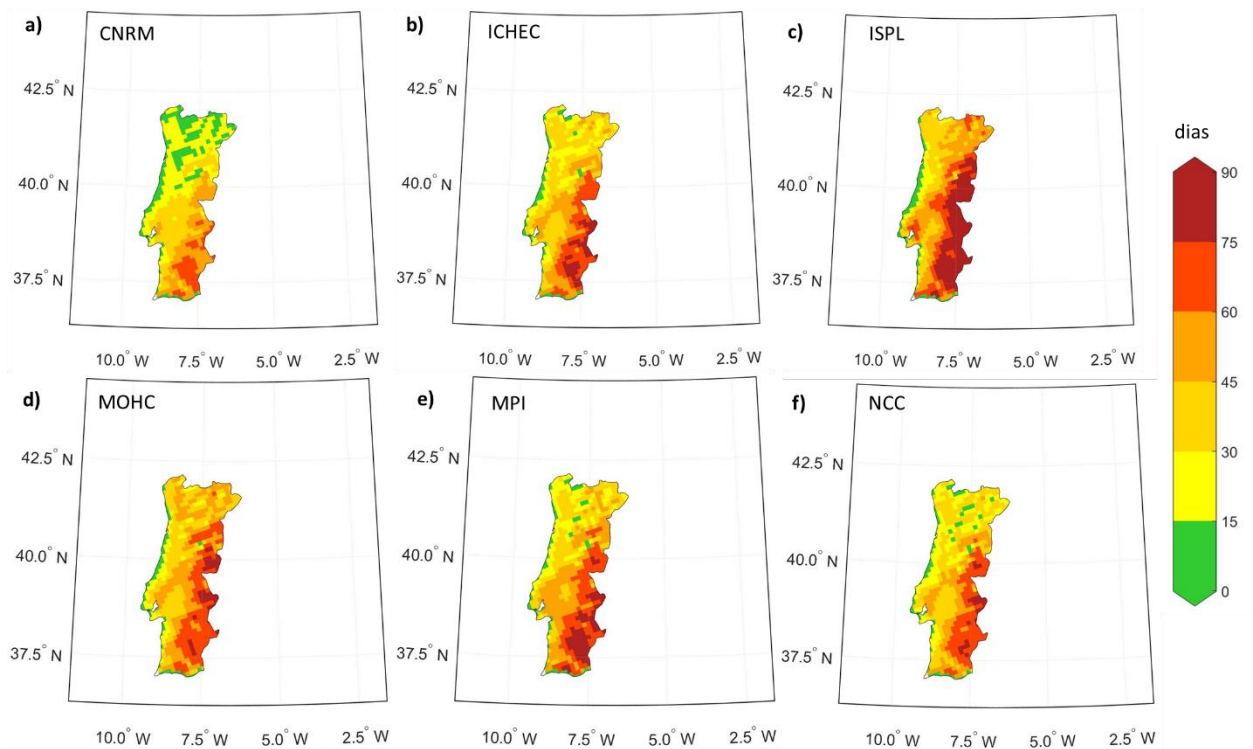


Figura 19- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco muito elevado de incêndio para o período futuro (2046-2065) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.

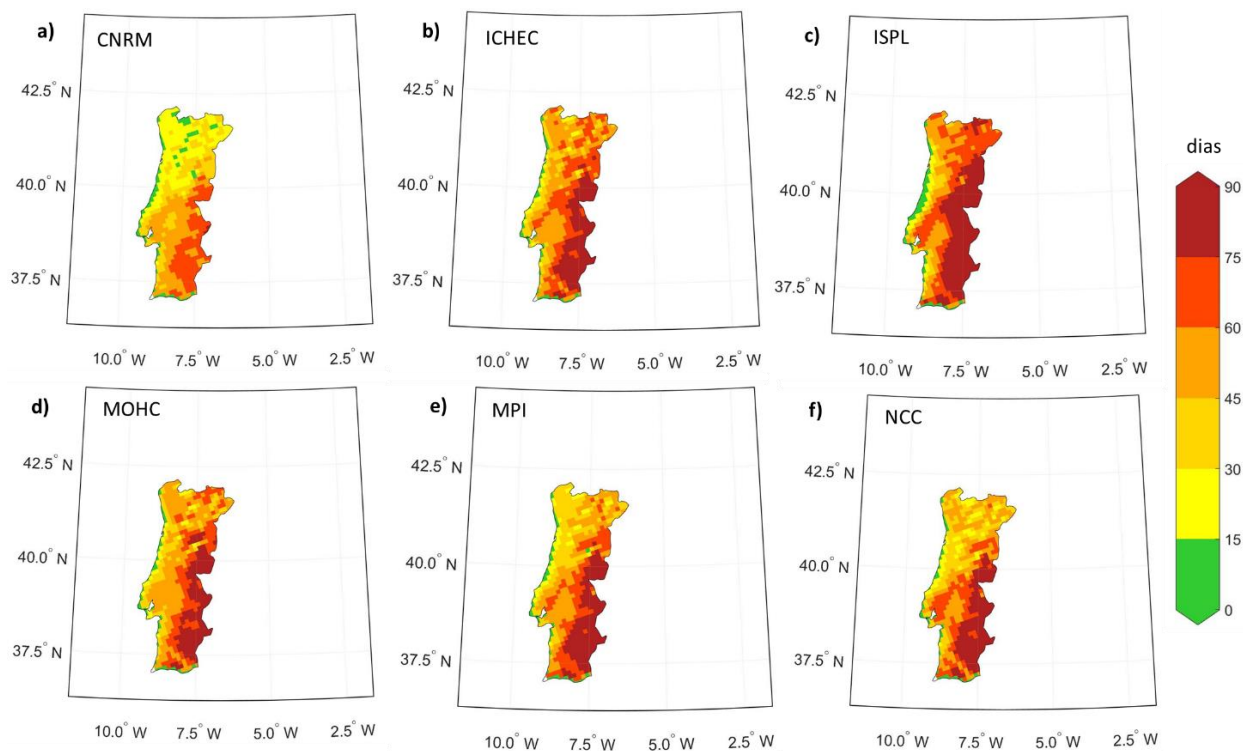


Figura 20- Representação espacial dos valores médios do número de dias com risco muito elevado de incêndio para o período futuro (2081-2100) para o modelo a) CNRM; b) ICHEC; c) ISPL; d) MOHC; e) MPI e f) NCC.

4.2.4.4. Ensemble Histórico e Futuro

Nas figuras seguintes estão representados os valores médios mensais do FWI multi-modelo sob a forma de ensemble, para o período histórico (figura 21, 22 e 23.a), futuro próximo (figura 21, 22 e 23.b) e período futuro de 2081-2100 (figura 21, 22 e 23.c)). O objetivo nesta secção é de se observar quais são as projeções futuras para a variação do número de dias com risco moderado, elevado e muito elevado de incêndio, mais concretamente como será a variação em número e em área.

4.2.4.4.1. Número de dias com risco moderado

Inicialmente calculou-se a média multi-modelo do número de dias com risco moderado de incêndio, ou seja, valores médios diários de FWI superior a 15 para o período de referência (1986-2005) (figura 21.a)), período futuro (2046-2065) (figura 21.b)) e período futuro 2 (2081-2100) (figura 21.c)).

Os valores mais elevados ocorrem em ambos os períodos no interior sul do país. É possível de se observar que do período histórico, figura 21.a), para o período futuro no final do século, figura 21.c), existe claramente um aumento do número de dias com risco moderado, em que esse aumento ocorre em número e em extensão. Se analisarmos com maior detalhe a figura 21, podemos constatar que, para o período histórico 1986-2005 (figura 21.a)) na região norte e centro tínhamos um número médio de dias com risco moderado a variar entre 80-120, cor

laranja, e a sul 120-160, cor laranja mais escuro. No período futuro de 2046-2065, figura 21.b), apenas o litoral norte mantém o mesmo padrão, e passamos a ter na região centro um número médio de dias que varia entre 120-160 dias (cor laranja escuro) e em algumas áreas muito localizadas 160-200 dias (cor vermelha) e na região sul uma variação de 160-200 dias (cor vermelha) com risco moderado de incêndio. No final do século, figura 21.c), é possível observar um aumento da extensão da área, aumento de sul-norte, com um número médio de dias de 160-200 (cor vermelha).

É ainda possível de se observar, um gradiente espacial acentuado de Norte para Sul, em que passamos de variações de 40 dias a norte, cor amarela, para variações de 200 dias a sul, cor vermelha, sendo que esta frequência de ocorrência se agrava no futuro.

Assim, podemos concluir que, Portugal passará a estar, no final do século, mais de metade do ano sob risco moderado de incêndio, ou seja, valores de FWI superiores a 15, uma vez que uma estação do ano tem uma duração de 90 dias. No entanto, apesar de ser um período de dias muito elevado é importante ter em atenção que este número de dias elevado, em média 200-240 dias, ocorre apenas no interior sul (Faro e Beja). As regiões que estarão um maior número de dias sob risco moderado de incêndio, cor laranja escuro e vermelho, no futuro 2046-2065 são Faro, Beja, Évora, Portalegre, Castelo Branco, Santarém, Guarda, sendo que no final do século, 2081-2100, acrescenta-se Bragança, Viseu, Coimbra, Lisboa, Setúbal, ou seja, maior parte do território.

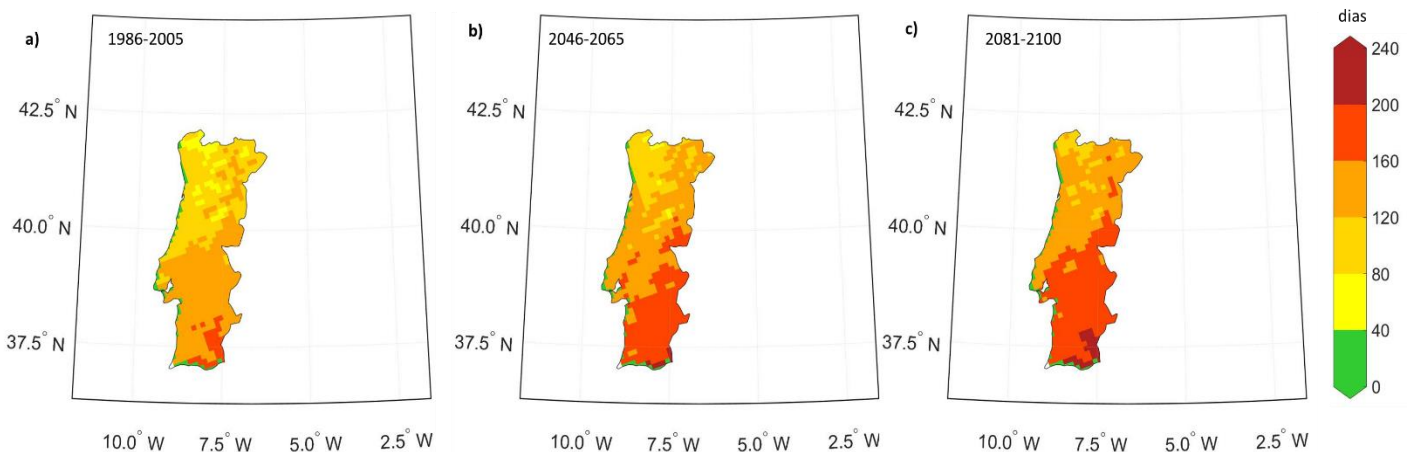


Figura 21- Representação espacial do ensemble multi-modelo do número de dias com risco moderado de incêndio para a) o período histórico (1986-2005); b) o período futuro 2046-2065; c) o período futuro 2081-2100.

4.2.4.4.2. Número de dias com risco elevado

Na análise das figuras com o número de dias com risco elevado mantém-se em média o mesmo padrão espacial que anteriormente, ou seja, as áreas são as mesmas, mas a extensão aumenta, passamos de pontos mais localizados para áreas maiores. Por exemplo, é possível ver que, no período histórico, a norte temos em média um número de dias com risco moderado que varia entre 25-50 dias (amarelo) e a sul 100-125 dias (cor vermelho), figura 22.a). Enquanto que, no período futuro 2046-2065, passamos a ter um aumento da área com um número médio de

dias que varia entre 75-100 dias, em que praticamente a região norte e centro de Portugal é abrangida (cor laranja escuro) e a sul passamos a ter variações de 125-150 dias (cor encarnada), figura 22.b). No final do século, deixamos de ter áreas pontuais com um número baixo de dias com risco elevado e passamos a ter o litoral norte com variações de 75-100 dias e uma extensão em área do período futuro 2046-2065 para o período 2081-2100, em que variações médias entre 125-150 dias passam a também estar no interior centro, até cerca de 40°N de latitude.

Tendo em conta que o número de dias com risco elevado é definido quando o FWI é superior a 30, o que para o território Português já é um valor muito elevado, devido à presença de pinheiro bravo em grandes quantidades que favorecem a deflagração de um incêndio florestal. Assim, podemos concluir que praticamente quase toda a região sul e interior centro no final do século apresentam especial cuidado, visto que se encontram em média 125-150 dias sob risco elevado de incêndio (cor encarnada), mais concretamente, Faro, Beja, Évora, Portalegre, Castelo Branco, Guarda e algumas áreas em Santarém.

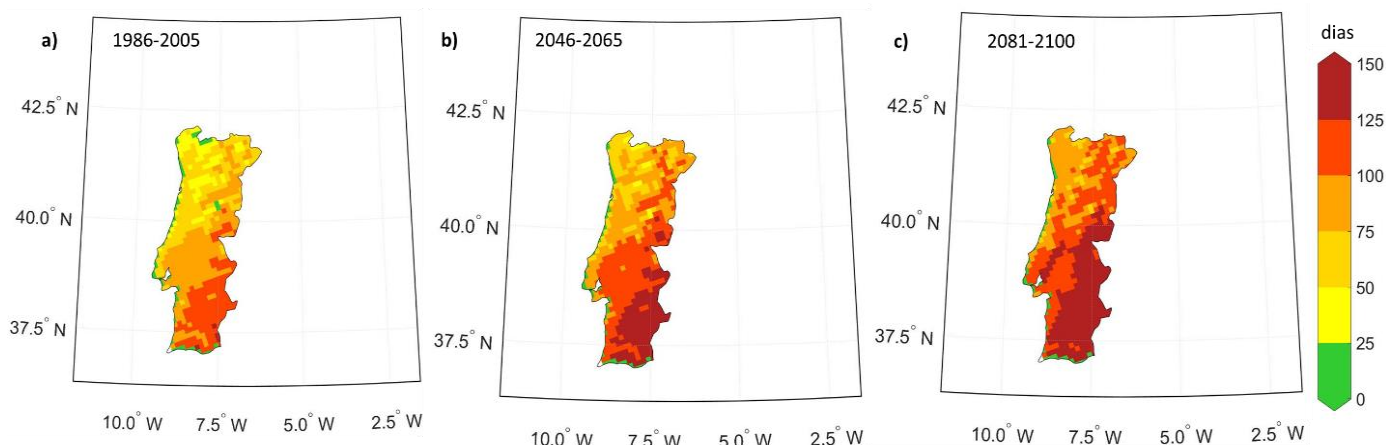


Figura 22- Representação espacial do ensemble multi-modelo do número de dias com risco elevado de incêndio para a) o período histórico (1986-2005); b) o período futuro 2046-2065; c) o período futuro 2081-2100.

4.2.4.4.3. Número de dias com risco muito elevado

As figuras seguintes mostram o resultado final, sob a forma de figura, do ensemble para o período histórico, figura 23.a), para um futuro próximo, figura 23.b) e para o período futuro no final do século, figura 23.c). À semelhança do padrão observado anteriormente, verifica-se uma vez mais um gradiente de norte para sul, mas também, um gradiente de oeste-leste, no final do século (figura 23.c)).

Analisando em maior detalhe cada uma das figuras podemos analisar que: para o período histórico registam-se um número médio de dias com risco muito elevado a norte que varia entre 15-30 dias (cor amarela) e no centro e sul esse número médio aumenta para 45-60 (cor laranja escuro), e pontualmente observam-se valores de 60-75 dias (cor vermelha), interior sul (Beja). No período futuro, figura 23.b), o número médio de dias a norte mantém-se em média

semelhante, 15-30 dias, contudo, observa-se um aumento do número de dias com risco muito elevado em zonas que no período histórico não apresentavam valores muito elevados, nomeadamente, a região interior centro e sul, 8° - 7.5°W de longitude e 37.5° - 40.5°N de latitude, passando estas zonas a estar sob um maior número de dias de risco de incêndio muito elevado. O cenário agrava-se no final do século, figura 23.c), em que as projeções realizadas mostram um aumento da extensão, em direção ao litoral, das áreas que se encontram em média 75-90 dias por ano com risco muito elevado de incêndio, aumentando assim o número de dias com risco muito elevado de incêndio em mais zonas do território. Para além disso, a norte e litoral centro aumenta o número de dias com risco muito elevado de incêndio, passando de 30-45 dias (laranja) para 45-60 dias (laranja escuro).

Podemos concluir que o número de dias com risco muito elevado poderá vir aumentar num futuro próximo, agravando-se no final do século, em que cidades que não eram sinalizadas como zonas que constituem perigo de incêndio passarão a estar, em que o número de dias com risco muito elevado é ainda significativo, tendo em conta que para Portugal um valor de FWI superior a 38.2 já é considerado risco extremo de incêndio, dado a enorme quantidade de pinheiro bravo existente em muitas áreas florestais do nosso território, quanto mais valores superiores a 45. Assim, a região do interior estrará sob alerta máximo de incêndio, em média, 60-75 dias por ano, sendo que, no futuro o cenário agrava-se para 75-90 dias por ano. Sabendo que o verão tem uma duração de 90 dias, podemos verificar que o interior centro e sul (Beja, Évora, Portalegre, Santarém, Castelo Branco e parte da Guarda) passará praticamente o verão sob alerta máximo de incêndio e que o restante território, com exceção do litoral, metade do verão.

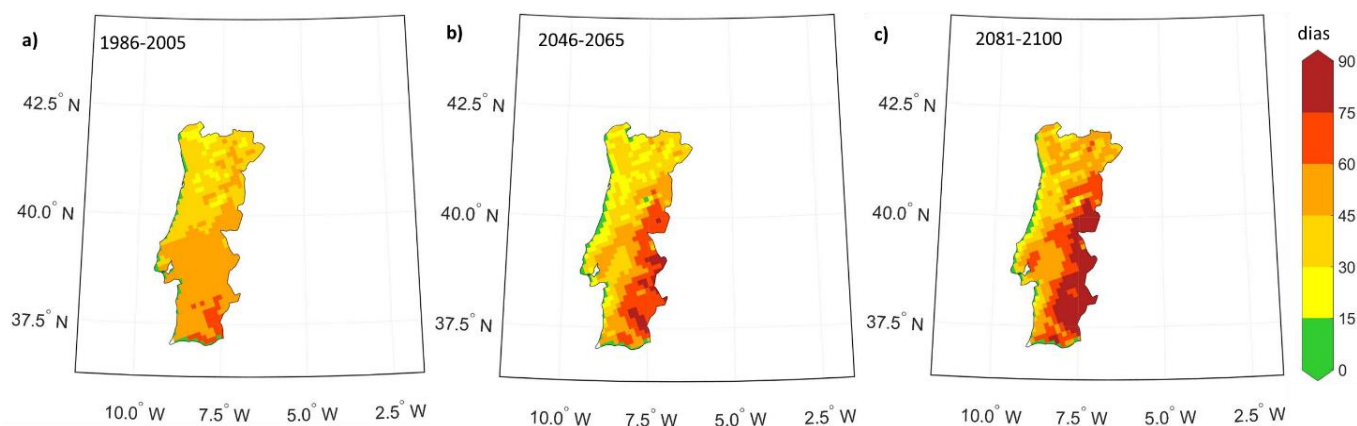


Figura 23- Representação espacial do ensemble multi-modelo do número de dias com risco muito elevado de incêndio para a) o período histórico (1986-2005); b) o período futuro 2046-2065; c) o período futuro 2081-2100.

As figuras seguintes representam a diferença entre as médias multi-modelo (ensemble) entre o período histórico 1986-2005 e período futuro 2046-2065, e a diferença entre o período futuro 2046-2065 e período futuro 2081-2100. O objetivo principal com a análise destas figuras tem que ver em visualizar quais as variações, em termos médios, ocorrem entre os três períodos.

A figura 24. a) representa a diferença entre o período futuro 2046-2065 e período de referência 1986-2005 e figura 24.a) e a diferença entre período futuro 2081-2100 e período de referência 1986-2005, figura 24.b), para a variável número de dias com risco moderado de incêndio. Podemos concluir, pela análise da figura que, entre o período futuro (2046-2065) e o período de referência 1986-2005 o número médio de dias com risco moderado aumente cerca de 20-30 dias (cor creme) em quase todo o território, em áreas localizada poderá aumentar entre 30-40 dias (cor encarnada), enquanto que o litoral apresenta uma diminuição do número de dias, em média -40 a -30 dias por ano com risco moderado de incêndio (cor azul), que poderá estar associada a um problema de interpolações dos modelos. Do período histórico, 1986-2005, para o período futuro, 2081-2100, observa-se que ocorre um aumento do número de dias de, em média, 30-40 dias (cor encarnado) em praticamente todo o território, e no litoral uma diminuição de -40 a -30 dias por ano (cor azul). Assim, os resultados obtidos mostram que do período histórico para o período futuro no final do século, 2081-2100, projeta-se que o número de dias com risco moderado aumente cerca de 30 a 40 dias em média.

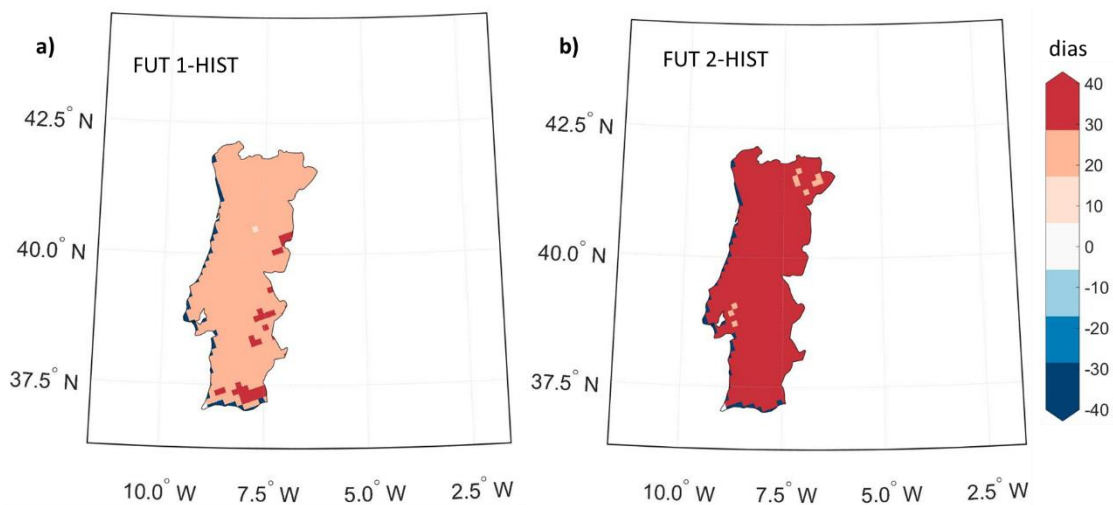


Figura 24- Representação espacial da diferença entre o ensemble multi-modelo da variável número de dias com risco moderado para a) período futuro (2046-2065) e o período de referência (1986-2005); b) período futuro (2081-2100) e o período de referência (1986-2005);

A figura seguinte representa a diferença entre o período futuro 2046-2065 e período de referência 1986-2005 e figura 25.a) e a diferença entre período futuro 2081-2100 e período de referência 1986-2005, figura 25.b), para a variável número de dias com risco elevado de incêndio. Podemos concluir, pela análise da figura que, entre o período futuro (2046-2065) e o período de referência 1986-2005 o número médio de dias com risco elevado aumenta cerca de 20-30 dias (cor creme) em quase todo o território, em áreas localizadas um aumento de 10-20 dias (cor creme claro), enquanto que no litoral apresenta uma diminuição do número de dias de -40 a -30 dias (cor azul). Do período histórico, 1986-2005, para o período futuro, 2081-2100, observa-se que ocorre um aumento do número de dias de, em média, 30-40 dias (cor encarnado) em praticamente todo o território, e no litoral uma diminuição de -40 a -30 dias por ano (cor azul). Assim, os resultados obtidos mostram que do período histórico para o período futuro no final do século, 2081-2100, projeta-se que o número de dias com risco elevado aumente cerca de 30 a 40 dias em média.

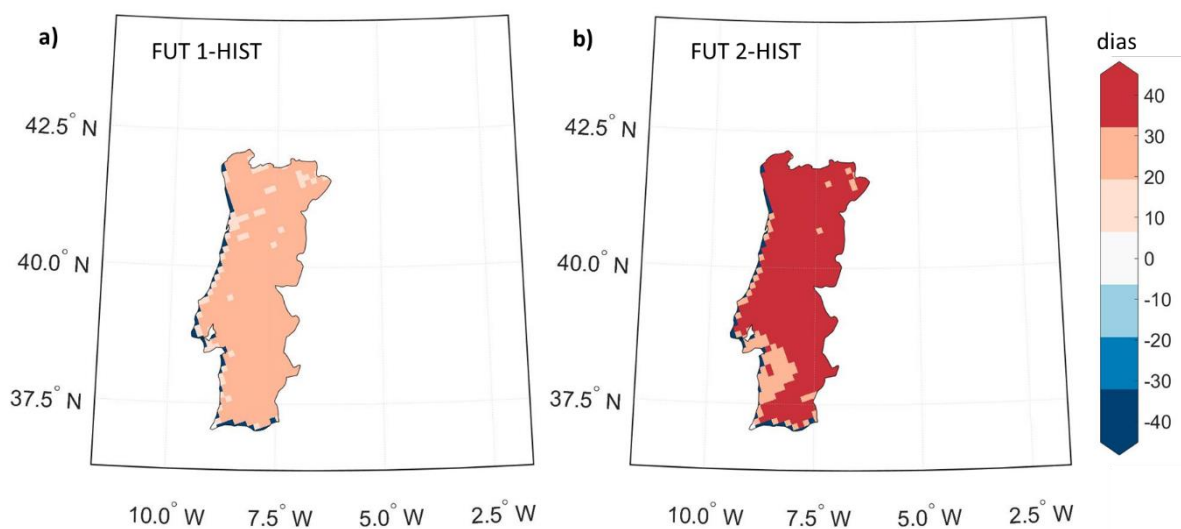


Figura 25- Representação espacial da diferença entre o ensemble multi-modelo da variável número de dias com risco elevado para a) período futuro (2046-2065) e o período de referência (1986-2005); b) período futuro (2081-2100) e o período de referência (1986-2005);

A figura 26.a) representa a diferença entre o período futuro 2046-2065 e período de referência 1986-2005 e figura 26.a) e a diferença entre período futuro 2081-2100 e período de referência 1986-2005, figura 26.b), para a variável número de dias com risco muito elevado de incêndio. Podemos concluir, pela análise da figura 26.a) que, entre o período futuro (2046-2065) e o período de referência 1986-2005 o número médio de dias com risco muito elevado aumentou, em média, 10-20 dias nas regiões mais junto do litoral (cor creme clara) e 20-30 dias no interior (cor creme) e diminuiu no litoral -40 a -30 dias (cor azul) e numa área localizada no litoral não houve alteração (cor branca). Do período histórico, 1986-2005, para o período futuro, 2081-2100, observa-se que ocorre um aumento do número de dias de, em média, 30-40 dias (cor encarnado) no interior centro e sul e em áreas pontuais no norte, e no litoral uma diminuição de -40 a -30 dias por ano (cor azul). Assim, os resultados obtidos mostram que do período histórico para o período futuro no final do século, 2081-2100, projeta-se que o número de dias com risco muito elevado aumente cerca de 30 a 40 dias em média.

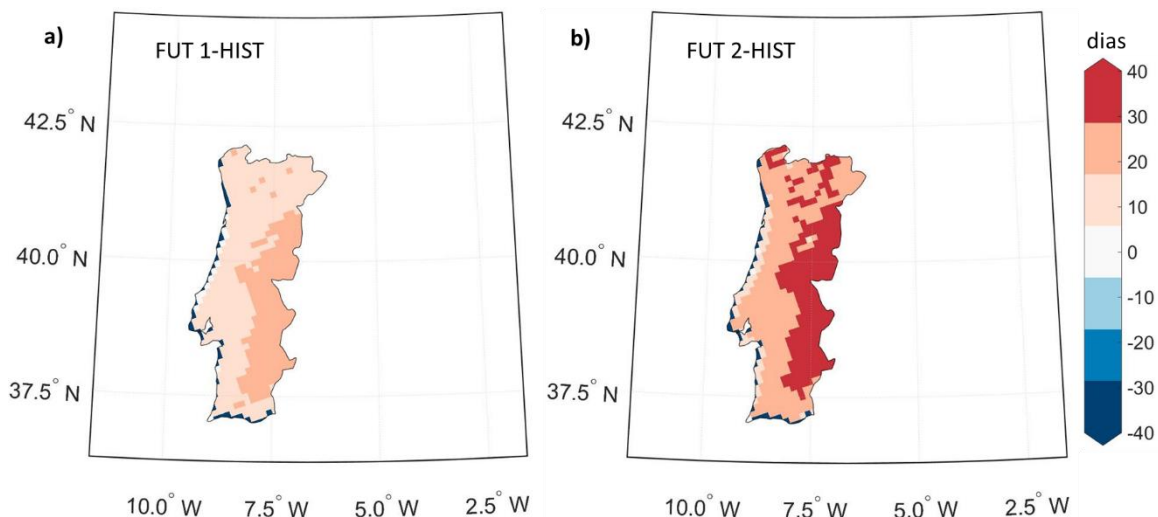


Figura 26- Representação espacial da diferença entre o ensemble multi-modelo da variável número de dias com risco elevado para a) período futuro (2046-2065) e o período de referência (1986-2005); b) período futuro (2081-2100) e o período de referência (1986-2005);

Concluindo, a partir da análise das figuras anteriores podemos verificar, uma vez mais que o número de dias com risco moderado, elevado e muito elevado aumentará num período futuro próximo e esse aumento será ainda mais gravoso no final do século, devido ao agravamento das circunstâncias.

4.3. Condições atmosféricas propícias a incêndios

Por último, com objetivo de compreender no futuro que condições atmosféricas poderão propiciar valores muito elevados de FWI no território português, procurou-se para o ano 2055 um episódio em que se registava valores de FWI superiores a 38 e, de seguida, representou-se as variáveis atmosféricas que originaram esses valores. É de salientar que apenas representou-se para os valores obtidos pelo modelo MPI.

4.3.2. FWI

Na figura seguinte encontra-se representado a evolução do FWI para o período compreendido de 23 de julho a 28 de julho, figura 26. Identificou-se o dia 26 de julho, figura 26.d), como o dia que apresenta um maior número de pontos da malha com valores superiores a 38.

Observam-se os valores médios de FWI para um episódio futuro, compreendido de 23 de julho a 28 de julho do ano 2055. É possível ver uma sequência de dias com risco extremo de incêndio, identificado com as cores vermelha e laranja, cujos valores médios são superiores a 40. A partir da análise da evolução temporal apresentada para o FWI verifica-se, que do dia 23 para o dia 26 ocorre um aumento da extensão das áreas que apresentam valores elevados de FWI, 50-60 (cor encarnada). Vemos que, enquanto que nos dias 23, 24 e 25 tínhamos áreas pontuais que apresentavam valores de FWI entre 0-10, ou seja, risco muito baixo para ocorrer um incêndio, no dia 26 deixámos de ter essas áreas e passamos a ter praticamente todo o território sob risco máximo de incêndio, em que a mancha vermelha vai se estendendo por uma área maior.

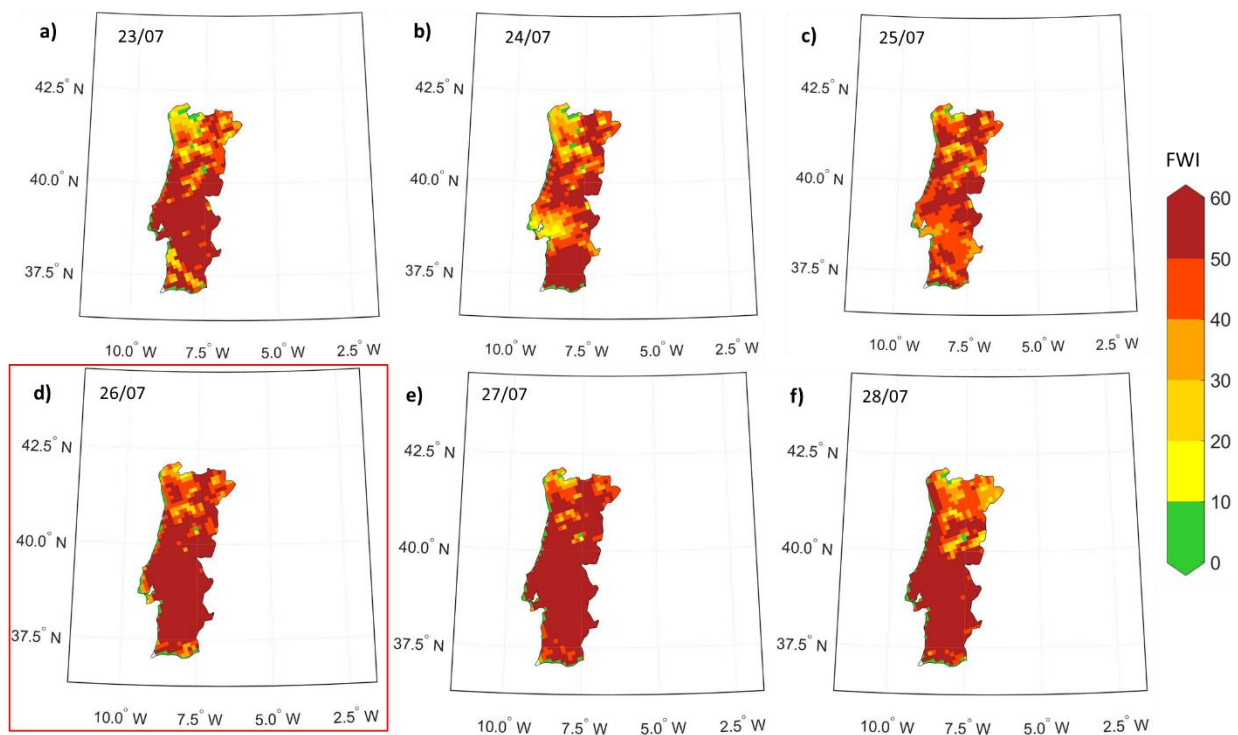


Figura 27- Representação espacial do FWI para o dia a) 23 de julho b) 24 de julho; c) 25 de julho; d) 26 de julho; e) 27 de julho e f) 28 de julho do ano 2055.

4.3.3. Temperatura a 2 metros

Encontra-se representado a evolução temporal da temperatura a 2 metros para o mesmo intervalo de tempo, figura 28. Ao longo dos dias verifica-se um aumento da temperatura média, em que podemos ver que existe uma mancha, com a cor mais encarnada, que se desloca para Noroeste, onde se atinge temperaturas médias de aproximadamente 38°C, em praticamente toda a região centro e parte do sul (figura 28.c) e que coincide com os valores elevados de FWI apresentados na figura anterior.

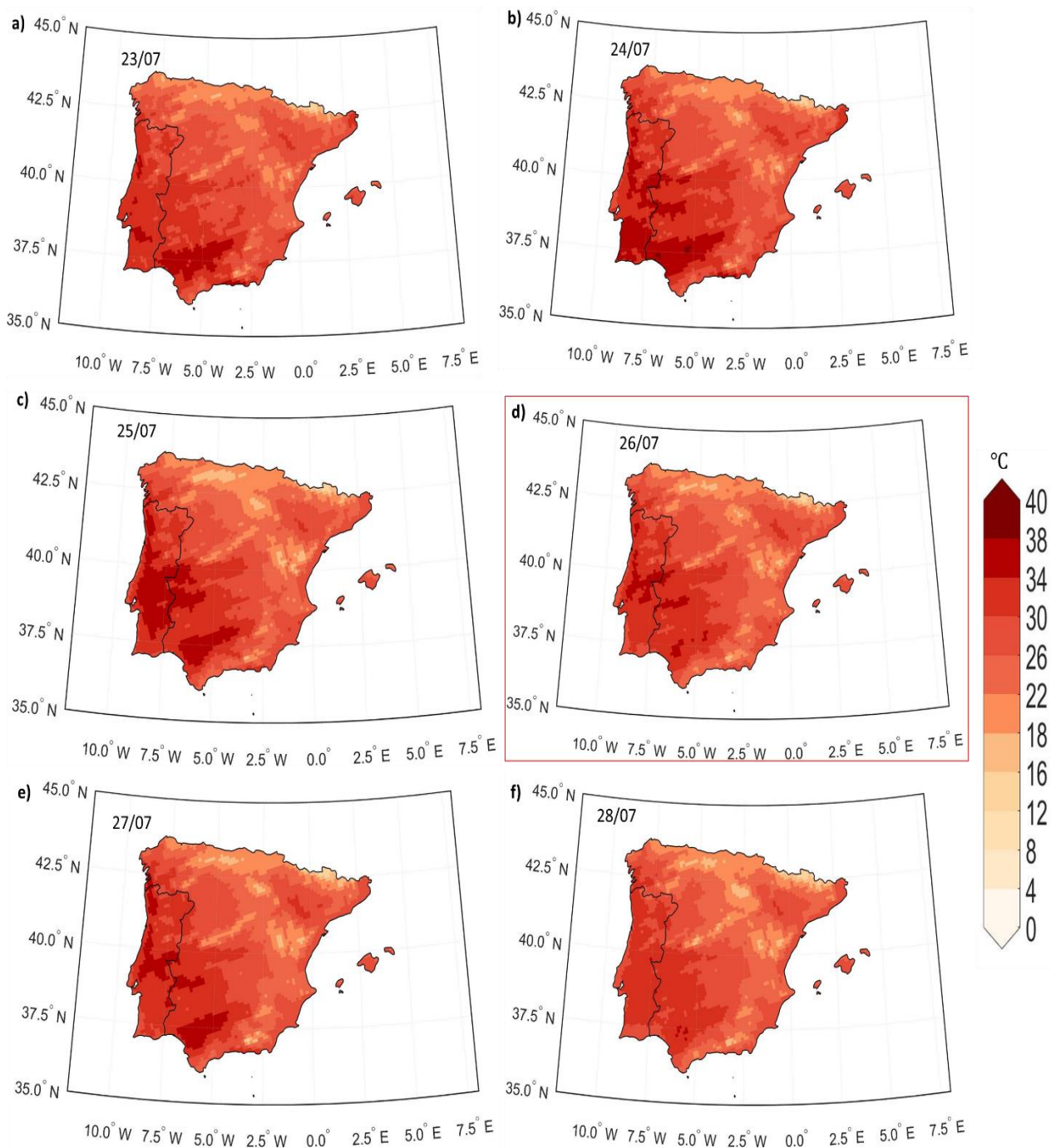


Figura 28- Representação espacial da temperatura a 2 metros para o dia a) 23 de julho b) 24 de julho; c) 25 de julho; d) 26 de julho; e) 27 de julho e f) 28 de julho do ano 2055.

4.3.4. Humidade Relativa

A Humidade Relativa, figura 29, é em média mais elevada nas latitudes mais a norte, principalmente norte de Espanha com valores entre 60-70%, em que existe uma grande influência do oceano. Nas zonas interiores, os valores médios da humidade relativa são muito baixos, 0-40%, em que se nota claramente que do dia 23 até ao dia 26 a humidade relativa apresenta uma tendência de diminuição em praticamente todo o território português, coincidente com a mancha que se desloca para noroeste e que caracteriza-se por temperaturas muito elevadas, 38°C. Assim, no dia 26 podemos ver que praticamente todo o território apresenta valores muito baixos de humidade relativa, 8-24% (tons claros). Podemos concluir que o padrão espacial é o mesmo que o observado para a temperatura, em que nas áreas que temos temperaturas muito elevadas temos valores de humidade relativa muito baixos e valores de FWI elevados.

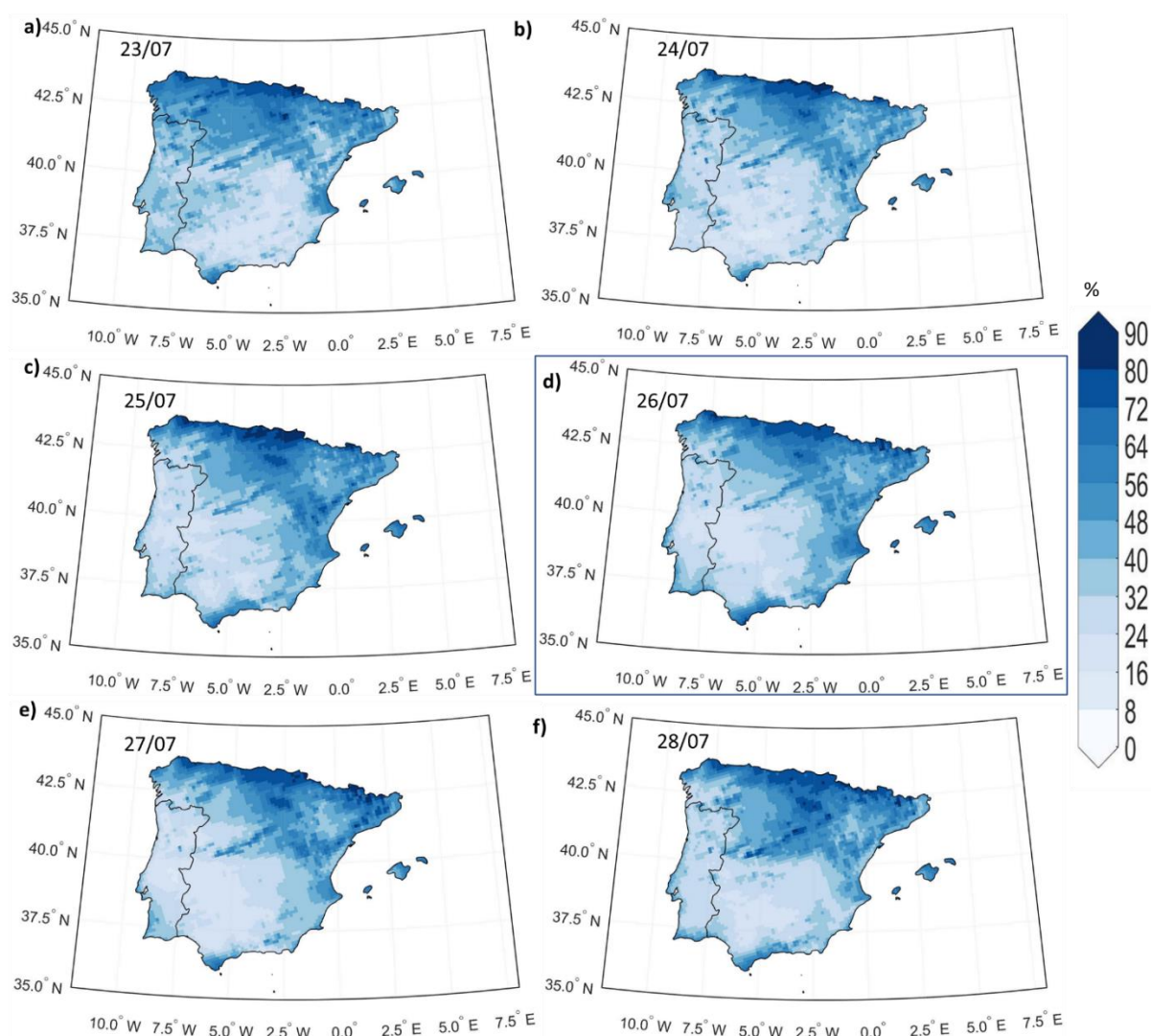


Figura 29- Representação espacial da humidade relativa para o dia a) 23 de julho b) 24 de julho; c) 25 de julho; d) 26 de julho; e) 27 de julho e f) 28 de julho do ano 2055.

4.3.5. Vento horizontal aos 10 metros

A figura seguinte representa a evolução ao longo dos dias escolhidos da direção e intensidade do vento horizontal. É possível identificar que o vento é predominantemente de leste, em que se nota nitidamente a advecção de ar continental, quente e seco, vindo de Espanha, coincidente com os valores elevados de temperatura e baixa humidade relativa. Podemos observar que é uma situação que persiste desde o dia 23 e que se mantém até dia 27.

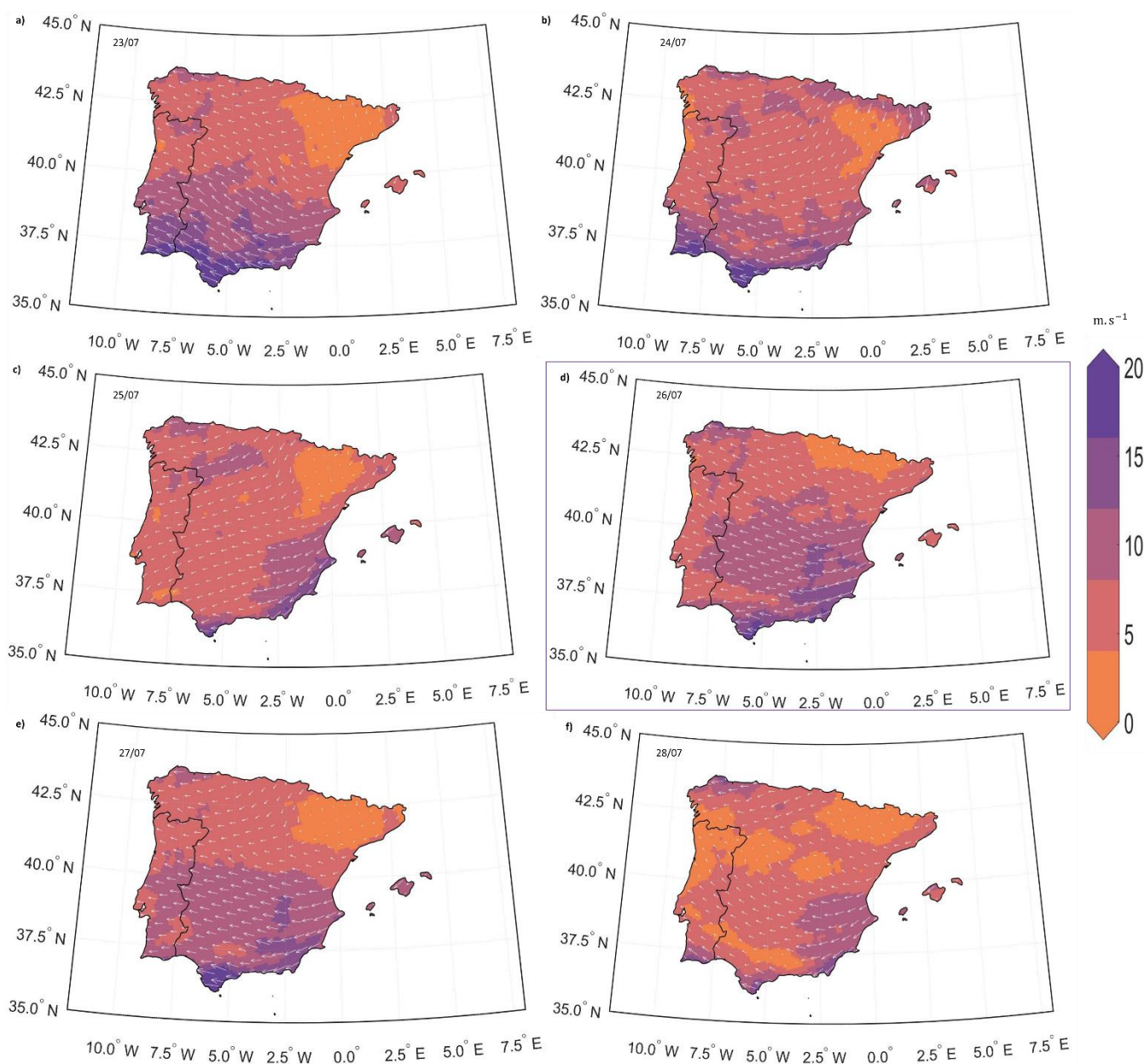


Figura 30- Representação espacial do vento horizontal aos 10 metros para o dia a) 23 de julho b) 24 de julho; c) 25 de julho; d) 26 de julho; e) 27 de julho e f) 28 de julho do ano 2055.

5. Conclusão

O presente trabalho estudou as condições médias da atmosfera durante a ocorrência de grandes incêndios florestais no período 2000-2019, o potencial risco de incêndio através do índice FWI calculado a partir de seis modelos para o cenário RCP8.5 e, por fim, analisou que condições atmosféricas propícias à ocorrência de incêndio podemos esperar no futuro. A análise foi feita para três períodos distintos, histórico (1986-2005), futuro próximo (2046-2065) e, para a variável número de dias com risco moderado, elevado e muito elevado acrescentou-se o período futuro para final do século (2081-2100), com objetivo de se comparar os resultados obtidos para ambos os períodos, projetando o risco de incêndio para o futuro, identificando as áreas com maior risco de incêndio.

As condições atmosféricas que originaram a deflagração de incêndios no período histórico 2000-2019 caracterizam-se por temperaturas muito elevadas na região centro e sul, coincidentes com as zonas onde a humidade relativa é mais baixa. As temperaturas menores observam-se na região norte e litoral, coincidentes com valores elevados de humidade relativa. A direção do vento é predominantemente do quadrante NW no litoral e na parte continental, principalmente região sul observa-se fluxo de leste, proveniente do Mediterrâneo. Os valores de CAPE não são muito expressivos.

Os valores máximos de FWI, no período de referência mostram que estes concentram-se principalmente no interior sul do território, nomeadamente, Beja e Évora. Em relação ao futuro, os resultados obtidos para os valores máximos e médios diários de FWI apresentam uma tendência geral de aumento em número e em área do período 1986-2005 para o período 2046-2065, em que o interior centro e sul são as áreas mais afetadas num futuro próximo e praticamente todo o território português no final do século passará a ter valores máximos de FWI superiores a 45 e médios diários que variam entre 4-8 a norte e 16-20 a sul.

Relativamente ao número de dias com risco moderado, elevado e muito elevado, espera-se que o número de dias com risco moderado aumente já no período 2046-2065, em que passaremos em média a estar cerca de 240 dias sob risco moderado de incêndio o que representa mais de metade de um ano civil. O número de dias com risco elevado e muito elevado apresentam resultados mais drásticos e que devem ser vistos com especial cuidado. Os resultados apresentados para o número de dias com risco elevado, $FWI > 30$, mostram que existe claramente um aumento em número e em área, em que no período histórico tínhamos apenas o interior sul que apresentava um maior número de dias e que no futuro próximo passamos a ter no interior centro e sul um aumento significativo, em que em média temos 75-10 dias a norte, 100-125 dias no centro e 125-150 dias a sul, do número de dias por ano com risco elevado de incêndio. No final do século o cenário agrava-se, em que temos um aumento da extensão da área que apresentam elevado número de dias com valores de $FWI > 30$, atingindo Beja, Évora, Portalegre, Castelo Branco, Guarda e algumas áreas em Santarém. Os resultados obtidos para o número de dias com risco muito elevado, valores de $FWI > 45$, apresentam um padrão espacial semelhante, em que no período de referência tínhamos apenas o interior sul a apresentar maior número de dias, para passar a ter no futuro próximo (2046-2065) o interior centro e sul com elevado número de dias com risco muito elevado, em média 60-75 dias por ano e no final do século, 2081-2100, 75-90 dias por ano, em que, Beja, Évora, Portalegre, Santarém, Castelo Branco e parte da Guarda passará praticamente o verão sob alerta máximo de incêndio. Tendo em conta que o limite $FWI > 38.2$ foi definido para Portugal (Fernandes 2019) como um valor que

representa risco extremo de incêndio, conclui-se que o interior centro e sul e até mesmo algumas cidades do interior norte apresentam valores muito elevados.

Assim, observou-se que existe uma variação inter-regional do perigo de incêndio, dado que existem gradientes leste-oeste e sul-norte, como consequência da influência oceânica, onde as regiões noroeste de Portugal (Viana do Castelo, Braga, Porto, Aveiro) com clima mais temperado caracterizam-se por valores de FWI mais baixos e um menor número de dias sob risco elevado e muito elevado de incêndio, enquanto que a região sul e interior (Beja, Évora, Portalegre, Santarém, Castelo Branco e parte da Guarda), mais quente e mais seco, apresenta valores mais altos de FWI. Concluindo, temos um agravamento das condições propícias a incêndios florestais especialmente no litoral norte que aumentou o risco de incêndio, passando de risco muito baixo para risco moderado. A maior intensificação ocorre para a região de Beja e Algarve, cujo o agravamento já poderá ser uma consequência das condições de seca nesta região.

Por fim, espera-se que no futuro ocorram maior número de dias com valores de FWI superiores a 38 e que as condições atmosféricas que propiciam a ocorrência de incêndios caracterizam-se por temperaturas muito elevadas, próximo dos 40°C, especialmente no interior e centro do país, exceção do litoral onde a temperatura apresenta valores menores. O vento do quadrante leste, com um transporte de ar continental que é muito quente e seco, nos resultados apresentados observa-se uma persistência do número de dias em que essas condições persistem.

É, no entanto, importante ter em atenção que os resultados apresentados não constituem uma certeza, são projeções realizadas com dados de modelos que apresentam sempre limitações, mesmo que tenhamos utilizado seis modelos e o cenário utilizado, RCP8.5, poderá não vir a acontecer. Contudo, é claro o aumento do perigo de incêndio florestal em Portugal.

6. Referências

Abadie, J., Dupouey, J.-L., Avon, C., Rochel, X., Tatoni, T., & Bergès, L. (2017). Forest recovery since 1860 in a Mediterranean region: drivers and implications for land use and land cover spatial distribution. *Landscape Ecology*, 33(2), 289–305. <https://doi.org/10.1007/s10980-017-0601-0>;

Abatzoglou, J. T., & Kolden, C. A. (2013). Relationships between climate and macroscale area burned in the western United States. *International Journal of Wildland Fire*, 22(7), 1003. <https://doi.org/10.1071/wf13019>;

Abatzoglou, J. T., Williams, A. P., & Barbero, R. (2019). Global Emergence of Anthropogenic Climate Change in Fire Weather Indices. *Geophysical Research Letters*, 46(1), 326–336. <https://doi.org/10.1029/2018gl080959>;

Ayugi, B., Tan, G., Gnitou, G. T., Ojara, M., & Ongoma, V. (2020). Historical evaluations and simulations of precipitation over East Africa from Rossby centre regional climate model. *Atmospheric Research*, 232, 104705. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2019.104705>;

Barbero, R., Abatzoglou, J. T., Pimont, F., Ruffault, J., & Curt, T. (2020). Attributing Increases in Fire Weather to Anthropogenic Climate Change Over France. *Frontiers in Earth Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00104>;

Barbero, R., Curt, T., Ganteaume, A., Maillé, E., Jappiot, M., & Bellet, A. (2019). Simulating the effects of weather and climate on large wildfires in France. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19(2), 441–454. <https://doi.org/10.5194/nhess-19-441-2019>;

Bedia, J., Herrera, S., & Gutiérrez, J. M. (2014). Assessing the predictability of fire occurrence and area burned across phytoclimatic regions in Spain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(1), 53–66. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-53-2014>;

Carmo, M., Ferreira, J., Mendes, M., Silva, Á., Silva, P., Alves, D., Reis, L., Novo, I., & Xavier Viegas, D. (2021). The climatology of extreme wildfires in Portugal, 1980–2018: Contributions to forecasting and preparedness. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.7411>;

Carmo, M., Moreira, F., Casimiro, P., & Vaz, P. (2011). Land use and topography influences on wildfire occurrence in northern Portugal. *Landscape and Urban Planning*, 100(1-2), 169–176. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.11.017>;

Carvalho, A., Flannigan, M. D., Logan, K. A., Gowman, L. M., Miranda, A. I., & Borrego, C. (2009). The impact of spatial resolution on area burned and fire occurrence projections in Portugal under climate change. *Climatic Change*, 98(1-2), 177–197. <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9667-2>;

Carvalho, A., Flannigan, M. D., Logan, K., Miranda, A. I., & Borrego, C. (2008). Fire activity in Portugal and its relationship to weather and the Canadian Fire Weather Index System. *International Journal of Wildland Fire*, 17(3), 328. <https://doi.org/10.1071/wf07014>;

Carvalho, D., Cardoso Pereira, S., & Rocha, A. (2020). Future surface temperature changes for the Iberian Peninsula according to EURO-CORDEX climate projections. *Climate Dynamics*, 56(1-2), 123–138. <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05472-3>;

Carvalho, D., Cardoso Pereira, S., & Rocha, A. (2021). Future surface temperatures over Europe according to CMIP6 climate projections: an analysis with original and bias-corrected data. *Climatic Change*, 167(1-2). <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03159-0>;

Cary, G. J., Keane, R. E., Gardner, R. H., Lavorel, S., Flannigan, M. D., Davies, I. D., Li, C., Lenihan, J. M., Rupp, T. S., & Mouillot, F. (2006). Comparison of the Sensitivity of Landscape-fire-succession Models to Variation in Terrain, Fuel Pattern, Climate and Weather. *Landscape Ecology*, 21(1), 121–137. <https://doi.org/10.1007/s10980-005-7302-9>;

Curt, T., & Frejaville, T. (2017). Wildfire Policy in Mediterranean France: How Far is it Efficient and Sustainable? *Risk Analysis*, 38(3), 472–488. <https://doi.org/10.1111/risa.12855>;

DaCamara, C. C., & Trigo, R. M. (n.d.). Circulation weather types and their influence on the fire regime in Portugal. *Advances in Forest Fire Research 2018*, 372–380. https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_40;

Dufresne, J.-L., Foujols, M.-A., Denvil, S., Caubel, A., Marti, O., Aumont, O., Balkanski, Y., Bekki, S., Bellenger, H., Benschila, R., Bony, S., Bopp, L., Braconnot, P., Brockmann, P., Cadule, P., Cheruy, F., Codron, F., Cozic, A., Cugnet, D., & de Noblet, N. (2013). Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5. *Climate Dynamics*, 40(9-10), 2123–2165. <https://doi.org/10.1007/s00382-012-1636-1>;

Evaluation of HadGEM2 model. (2008). Retrieved from https://www.inscc.utah.edu/~reichler/publications/papers/Collins_08_MetOffice_74.pdf;

Fargeon, H., Pimont, F., Martin-StPaul, N., De Caceres, M., Ruffault, J., Barbero, R., & Dupuy, J.-L. (2020). Projections of fire danger under climate change over France: where do the greatest uncertainties lie? *Climatic Change*, 160(3), 479–493. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02629-w>;

Fernandes. (2019). Variation in the Canadian Fire Weather Index Thresholds for Increasingly Larger Fires in Portugal. *Forests*, 10(10), 838. <https://doi.org/10.3390/f10100838>;

Fiorucci, P., Gaetani, F., & Minciardi, R. (2008). Development and application of a system for dynamic wildfire risk assessment in Italy. *Environmental Modelling & Software*, 23(6), 690–702. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2007.05.008>;

Flannigan, M. D., Logan, K. A., Amiro, B. D., Skinner, W. R., & Stocks, B. J. (2005). Future Area Burned in Canada. *Climatic Change*, 72(1-2), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-5935-y>;

Flannigan, M. D., Wotton, B. M., Marshall, G. A., de Groot, W. J., Johnston, J., Jurko, N., & Cantin, A. S. (2015). Fuel moisture sensitivity to temperature and precipitation: climate change implications. *Climatic Change*, 134(1-2), 59–71. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1521-0>;

Hazeleger, W., Wang, X., Severijns, C., Ștefănescu, S., Bintanja, R., Sterl, A., Wyser, K., Semmler, T., Yang, S., van den Hurk, B., van Noije, T., van der Linden, E., & van der Wiel, K. (2011). EC-Earth

V2.2: description and validation of a new seamless earth system prediction model. *Climate Dynamics*, 39(11), 2611–2629. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1228-5>;

Hernandez, C., Drobinski, P., Turquety, S., & Dupuy, J.-L. (2015). Size of wildfires in the Euro-Mediterranean region: observations and theoretical analysis. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(6), 1331–1341. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-1331-2015>;

Iles, C. E., Vautard, R., Strachan, J., Joussaume, S., Eggen, B. R., & Hewitt, C. D. (2020). The benefits of increasing resolution in global and regional climate simulations for European climate extremes. *Geoscientific Model Development*, 13(11), 5583–5607. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-5583-2020>;

Introduction to climate dynamics and climate modelling - Welcome Page. (2010). Retrieved September 4, 2019, from Climate.be website: <http://www.climate.be/textbook/>;

Iversen, T., Bentsen, M., Bethke, I., Debernard, J. B., Kirkevåg, A., Seland, Ø., Drange, H., Kristjansson, J. E., Medhaug, I., Sand, M., & Seierstad, I. A. (2013). The Norwegian Earth System Model, NorESM1-M – Part 2: Climate response and scenario projections. *Geoscientific Model Development*, 6(2), 389–415. <https://doi.org/10.5194/gmd-6-389-2013>;

Jacob, D., Teichmann, C., Sobolowski, S., Katragkou, E., Anders, I., Belda, M., Benestad, R., Boberg, F., Buonomo, E., Cardoso, R. M., Casanueva, A., Christensen, O. B., Christensen, J. H., Coppola, E., De Cruz, L., Davin, E. L., Dobler, A., Domínguez, M., Fealy, R., & Fernandez, J. (2020). Regional climate downscaling over Europe: perspectives from the EURO-CORDEX community. *Regional Environmental Change*, 20(2). <https://doi.org/10.1007/s10113-020-01606-9>;

Jungclaus, J. H., Fischer, N., Haak, H., Lohmann, K., Marotzke, J., Matei, D., Mikolajewicz, U., Notz, D., & von Storch, J. S. (2013). Characteristics of the ocean simulations in the Max Planck Institute Ocean Model (MPIOM) the ocean component of the MPI-Earth system model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 5(2), 422–446. <https://doi.org/10.1002/jame.20023>;

Kjellström, E., Bärring, L., Nikulin, G., Nilsson, C., Persson, G., & Strandberg, G. (2016). Production and use of regional climate model projections – A Swedish perspective on building climate services. *Climate Services*, 2-3, 15–29. <https://doi.org/10.1016/j.cliser.2016.06.004>;

Kovats RS, Valentini R, Bouwer LM, Georgopoulou E, Jacob D, Martin E, Rounsevell M, Soussana JF, Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Levy AN, MacCracken, Mastrandrea PR. (2014) Climate change 2014 in Europe: impacts, adaptation, and vulnerability. Part B: regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change;

Le Page, Y., Pereira, J. M. C., Trigo, R., da Camara, C., Oom, D., & Mota, B. (2008). Global fire activity patterns (1996–2006) and climatic influence: an analysis using the World Fire Atlas. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 8(7), 1911–1924. <https://doi.org/10.5194/acp-8-1911-2008>;

Le Pichon, A., Assink, J. D., Heinrich, P., Blanc, E., Charlton-Perez, A., Lee, C. F., ... Claud, C. (2015). Comparison of co-located independent ground-based middle atmospheric wind and

temperature measurements with numerical weather prediction models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(16), 8318–8331. <https://doi.org/10.1002/2015jd023273>;

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

Moriondo, M., Good, P., Durao, R., Bindi, M., Giannakopoulos, C., & Corte-Real, J. (2006). Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area. *Climate Research*, 31, 85–95. <https://doi.org/10.3354/cr031085>;

NOA/Anna Karali. (2019) Fire Weather Index (FWI)- Dataset Description. Ref: C3S_D422_Lot2_TEC.2.1.3_201907_FWI_dataset_description_v2;

Novo, I., & et. al. (n.d.). Fires in Portugal on 15th October 2017: a catastrophic evolution. *Advances in Forest Fire Research 2018*, 57–70. https://doi.org/10.14195/978-989-26-16-506_5;

Parente, J., Amraoui, M., Menezes, I., & Pereira, M. G. (2019). Drought in Portugal: Current regime, comparison of indices and impacts on extreme wildfires. *Science of the Total Environment*, 685, 150–173. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.298>;

Parisien, M.-A., Parks, S. A., Krawchuk, M. A., Flannigan, M. D., Bowman, L. M., & Moritz, M. A. (2011). Scale-dependent controls on the area burned in the boreal forest of Canada, 1980–2005. *Ecological Applications*, 21(3), 789–805. <https://doi.org/10.1890/10-0326.1>;

Pereira, M. G., Trigo, R. M., da Camara, C. C., Pereira, J. M. C., & Leite, S. M. (2005). Synoptic patterns associated with large summer forest fires in Portugal. *Agricultural and Forest Meteorology*, 129(1-2), 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2004.12.007>;

Pereira, S. C., Carvalho, D., & Rocha, A. (2021). Temperature and Precipitation Extremes over the Iberian Peninsula under Climate Change Scenarios: A Review. *Climate*, 9(9), 139. <https://doi.org/10.3390/cli9090139>;

Pereira, S. C., Marta-Almeida, M., Carvalho, A. C., & Rocha, A. (2017). Heat wave and cold spell changes in Iberia for a future climate scenario. *International Journal of Climatology*, 37(15), 5192–5205. <https://doi.org/10.1002/joc.5158>;

Pimont, F., Ruffault, J., Martin-StPaul, N. K., & Dupuy, J.-L. . (2019). Why is the effect of live fuel moisture content on fire rate of spread underestimated in field experiments in shrublands? *International Journal of Wildland Fire*, 28(2), 127. <https://doi.org/10.1071/wf18091>;

Potter, B. (2018). The Haines Index – it’s time to revise it or replace it. *International Journal of Wildland Fire*, 27(7), 437. <https://doi.org/10.1071/wf18015>;

Rodrigues, M., Trigo, R. M., Vega-García, C., & Cardil, A. (2020). Identifying large fire weather typologies in the Iberian Peninsula. *Agricultural and Forest Meteorology*, 280, 107789. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107789>;

- Rovithakis, A., Grillakis, M. G., Seiradakis, K. D., Giannakopoulos, C., Karali, A., Field, R., Lazaridis, M., & Voulgarakis, A. (2022). Future climate change impact on wildfire danger over the Mediterranean: the case of Greece. *Environmental Research Letters*, 17(4), 045022. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5f94>;
- Ruffault, J., Curt, T., Martin St-Paul, N. K., Moron, V., & Trigo, R. M. (2017). Extreme Wildfire occurrence in response to Global Change type Droughts in the Northern Mediterranean. <https://doi.org/10.5194/nhess-2017-415>;
- Russo, A., Gouveia, C. M., Dutra, E., Soares, P. M. M., & Trigo, R. M. (2019). The synergy between drought and extremely hot summers in the Mediterranean. *Environmental Research Letters*, 14(1), 014011. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aaf09e>;
- Soares, P. M. M., Cardoso, R. M., Ferreira, J. J., & Miranda, P. M. A. (2015). Climate change and the Portuguese precipitation: ENSEMBLES regional climate models results. *Climate Dynamics*, 45(7), 1771–1787. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2432-x>;
- Sousa, P. M., Trigo, R. M., Pereira, M. G., Bedia, J., & Gutiérrez, J. M. (2015). Different approaches to model future burnt area in the Iberian Peninsula. *Agricultural and Forest Meteorology*, 202, 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.11.018>;
- Srock, A., Charney, J., Potter, B., & Goodrick, S. (2018). The Hot-Dry-Windy Index: A New Fire Weather Index. *Atmosphere*, 9(7), 279. <https://doi.org/10.3390/atmos9070279>;
- Trigo, R. M., Sousa, P. M., Pereira, M. G., Rasilla, D., & Gouveia, C. M. (2013). Modelling wildfire activity in Iberia with different atmospheric circulation weather types. *International Journal of Climatology*, 36(7), 2761–2778. <https://doi.org/10.1002/joc.3749>;
- Turco, M., Bedia, J., Di Liberto, F., Fiorucci, P., von Hardenberg, J., Koutsias, N., Llasat, M.-C., Xystrakis, F., & Provenzale, A. (2016). Decreasing Fires in Mediterranean Europe. *PLOS ONE*, 11(3), e0150663. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0150663>;
- Turco, M., Jerez, S., Augusto, S., Tarín-Carrasco, P., Ratola, N., Jiménez-Guerrero, P., & Trigo, R. M. (2019). Climate drivers of the 2017 devastating fires in Portugal. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50281-2>;
- Turco, M., Rosa-Cánovas, J. J., Bedia, J., Jerez, S., Montávez, J. P., Llasat, M. C., & Provenzale, A. (2018). Exacerbated fires in Mediterranean Europe due to anthropogenic warming projected with non-stationary climate-fire models. *Nature Communications*, 9(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-06358-z>;
- Turco, M., von Hardenberg, J., AghaKouchak, A., Llasat, M. C., Provenzale, A., & Trigo, R. M. (2017). On the key role of droughts in the dynamics of summer fires in Mediterranean Europe. *Scientific Reports*, 7(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-017-00116-9>;
- Voldoire, A., Sanchez-Gomez, E., Salas y Mélia, D., Decharme, B., Cassou, C., Sénési, S., Valcke, S., Beau, I., Alias, A., Chevallier, M., Déqué, M., Deshayes, J., Douville, H., Fernandez, E., Madec, G., Maisonnave, E., Moine, M.-P., Planton, S., Saint-Martin, D., & Szopa, S. (2012). The CNRM-CM5.1 global climate model: description and basic evaluation. *Climate Dynamics*, 40(9-10), 2091–2121. <https://doi.org/10.1007/s00382-011-1259-y>;

Wagner, C. E. V. (1977). Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research*, 7(1), 23–34. <https://doi.org/10.1139/x77-004>;

Wang, X., Thompson, D. K., Marshall, G. A., Tymstra, C., Carr, R., & Flannigan, M. D. (2015). Increasing frequency of extreme fire weather in Canada with climate change. *Climatic Change*, 130(4), 573–586. <https://doi.org/10.1007/s10584-015-1375-5>;

Anexos

Tabela 1- Episódios com valores de FWI superiores a 38 para o ano de 2055.

episódio	dia	Pontos da malha	episódio	dia	pontos da malha	episódio	dia	pontos da malha
1	22	8	59	144	566	117	202	517
2	23	3	60	145	642	118	203	202
3	39	2	61	146	311	119	204	29
4	49	14	62	147	258	120	205	111
5	50	14	63	148	283	121	206	279
6	51	20	64	149	1162	122	207	167
7	52	6	65	150	1527	123	208	47
8	53	30	66	151	1551	124	209	69
9	54	33	67	152	1533	125	210	38
10	55	8	68	153	1493	126	211	88
11	59	4	69	154	1352	127	212	385
12	61	11	70	155	1685	128	213	472
13	63	13	71	156	1527	129	214	617
14	68	16	72	157	1528	130	215	889
15	69	151	73	158	1538	131	216	492
16	70	76	74	159	1700	132	217	366
17	71	19	75	160	1548	133	218	472
18	76	5	76	161	1296	134	219	423
19	77	7	77	162	482	135	220	793
20	91	1	78	163	600	136	221	1205
21	100	187	79	164	491	137	222	1305
22	101	29	80	165	449	138	223	963
23	102	2	81	166	583	139	224	989
24	103	18	82	167	459	140	225	1227
25	104	12	83	168	6	141	226	1341
26	105	3	84	169	533	142	227	964
27	106	86	85	170	959	143	228	494
28	107	198	86	171	751	144	229	708
29	108	45	87	172	393	145	230	1048
30	109	41	88	173	625	146	231	1660
31	110	6	89	174	1498	147	232	1452
32	112	125	90	175	1512	148	233	1273
33	113	135	91	176	1632	149	234	1213
34	114	93	92	177	1869	150	235	1501
35	118	172	93	178	1914	151	236	1440
36	119	249	94	179	1606	152	237	1059
37	120	234	95	180	961	153	238	1477
38	121	864	96	181	789	154	239	1291
39	122	1044	97	182	582	155	240	903
40	123	1179	98	183	607	156	241	858
41	124	1159	99	184	612	157	242	1369
42	125	880	100	185	433	158	243	1522
43	126	949	101	186	359	159	244	1568
44	127	1174	102	187	453	160	245	1483
45	128	1037	103	188	944	161	246	1420
46	129	653	104	189	466	162	247	1064
47	130	502	105	190	161	163	248	1644
48	131	135	106	191	96	164	249	1783
49	132	234	107	192	114	165	250	1583
50	133	451	108	193	362	166	251	1367
51	134	770	109	194	562	167	252	649
52	135	645	110	195	401	168	253	733
53	136	1593	111	196	655	169	254	302
54	137	1282	112	197	895	170	255	173
55	138	18	113	198	1246	171	256	223
56	140	2	114	199	955	172	257	196
57	142	2	115	200	644	173	258	22
58	143	81	116	201	574	174	259	82
1	22	8	59	144	566	117	202	517