



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Monitorização em Contínuo do Risco de Incêndio Florestal

Diana Fialho Jorge

Dissertação

Mestrado em Tecnologias Ambientais

Trabalho efetuado sob a orientação de
Professor Doutor Sérgio Miguel Gomes Lopes

Fevereiro de 2024



**Politécnico
de Viseu**

Escola Superior
de Tecnologia
e Gestão de Viseu

Monitorização em Contínuo do Risco de Incêndio Florestal

Diana Fialho Jorge

Dissertação

Mestrado em Tecnologias Ambientais

Trabalho efetuado sob a orientação de

Professor Doutor Sérgio Miguel Gomes Lopes

Fevereiro de 2024

AGRADECIMENTOS

Uma jornada acadêmica não se realizou de uma forma solitária. A intervenção e o apoio de diversas pessoas foram fulcrais para que pudesse chegar à tão esperada conclusão desta dissertação de mestrado.

Ao Professor Doutor Sérgio Miguel Gomes Lopes, pela sua orientação, apoio, disponibilidade e saber transmitido durante todo o percurso do projeto.

À Doutora Sandra Marina de Almeida Santos, pelo apoio, disponibilidade e pelo conhecimento que me transmitiu.

Aos meus Pais, a minha base, que sempre me apoiam e me fazem acreditar que sou capaz, que me ouvem nos momentos de desânimo, a quem fico a dever umas visitas.

À Doutora Isabelina Ferreira, a quem devo muito da vida, incluindo a força e persistência para que conseguisse terminar mais uma etapa.

Aos meus amigos Catarina S., Cátia A., Cátia S., João R.N., Jorge M. e Rafael V. pela amizade por si só, e que, mesmo estando espalhados pelo país e pelo mundo, estão sempre disponíveis para desabafos, partilhas, ironias, *private jokes* e por me fazerem acreditar que a vida tem coisas boas.

Aos amigos mais recentes que ganhei, direta e indiretamente, relacionados com o mestrado pelo companheirismo. Em especial à Morgana W., que para além de se ter tornado uma amiga para a vida, do ponto de vista académico esteve sempre disponível ao longo deste processo.

A todas estas pessoas, o meu sincero agradecimento.

RESUMO

O aumento de ondas de calor e períodos de seca prolongados, provocados pelas alterações climáticas, têm levado a um aumento significativo do risco de incêndio. É por isso importante estudar metodologias que auxiliem na sua previsão por forma a minimizar o número de ocorrências, a sua dimensão e consequências. Um dos principais fatores que determinam o risco de incêndio florestal é o teor de humidade dos combustíveis florestais, dado que influencia quase todos os fatores relacionados com o desenvolvimento de um incêndio, no entanto, a sua determinação pode ser trabalhosa e dispendiosa. Para tal, existem métodos expeditos que determinam o teor de humidade de combustíveis florestais em campo, permitindo uma monitorização à distância com menos custos e em tempo real. O objetivo central do presente trabalho foi o desenvolvimento de métodos de medição de parâmetros ambientais e florestais que permitam monitorizar em contínuo o risco de incêndio de uma determinada região, com representatividade temporal e espacial e a um custo reduzido, com a utilização de sensores de vareta (*fuel stick*), sensores de teor de humidade do solo e células de carga para uma monitorização ininterrupta da variação do peso de uma amostra de combustível florestal. No presente trabalho, foram testados vários métodos de determinação de teor de humidade de combustíveis, nomeadamente com um *fuel stick*, com sensores de humidade do solo e com uma balança com duas células de carga. Como forma de verificar a fiabilidade de um dos métodos testados, nomeadamente o *fuel stick*, os resultados da medição do teor de humidade do *fuel stick* foram comparados com índices de perigo de incêndio horários e diários, com o número de ocorrência de incêndios e áreas ardidas e com o teor de humidade modelado. Verificou-se que o teor de humidade do *fuel stick* se relaciona significativamente com os índices de perigo de incêndio FFMC, ISI e FWI, especialmente nos meses de julho e agosto, quer se tratem de valores horários ou diários. Da relação com o índice FWI resultou uma equação de regressão que possibilita definir as classes de risco de incêndio. Considerando os dados dos incêndios, resultou uma relação significativa entre o teor de humidade do *fuel stick* com o número de ocorrências diárias. Daqui resultou uma equação que permite estimar o número de ocorrências diárias com base no teor de humidade do *fuel stick* registado às 12 UTC. Relativamente à relação com o teor de humidade modelado, concluiu-se que o melhor modelo é o que utiliza ramos de pinheiro-bravo morto, de 3 cm a 5 cm de diâmetro, classificados como combustíveis de 100h e que os valores do teor de humidade do *fuel stick* são sempre mais reduzidos do que o teor de humidade modelado.

Palavras-chave: incêndios; combustíveis florestais; humidade; FWI; *fuel stick*.

ABSTRACT

The increase in heat waves and prolonged periods of drought caused by climate change has led to a significant increase in the risk of fire. It is therefore important to study methodologies that help predict them to minimize the number of occurrences, their size and consequences. One of the main factors that determines the risk of forest fires is the moisture content of forest fuels, as it influences almost all factors related to the development of a fire. To this end, there are expedient methods for determining the moisture content of forest fuels in the field, allowing for less costly remote monitoring in real time. The main objective of this work was to develop methods for measuring environmental and forestry parameters that allow continuous monitoring of the fire risk in each region, with temporal and spatial representativeness and at a low cost, using fuel stick sensors, soil moisture content sensors and load cells for uninterrupted monitoring of the variation in the weight of a forest fuel sample. In this work, various methods of determining the moisture content of fuels were tested, namely with a fuel stick, soil moisture sensors and a scale with two load cells. To verify the reliability of one of the methods tested, namely the fuel stick, the results of measuring the moisture content of the fuel stick were compared with hourly and daily fire danger indices, with the number of fires and burnt areas and with the modeled moisture content. The moisture content of the fuel stick was found to be significantly related to the FFMC, ISI and FWI fire danger indices, especially in the months of July and August, both for hourly and daily values. The relationship with the FWI index resulted in a regression equation that makes it possible to define fire risk classes. Considering the fire data, there was a significant relationship between the moisture content of the fuel stick and the number of daily occurrences. This resulted in an equation that makes it possible to estimate the number of daily occurrences based on the moisture content of the fuel stick recorded at 12 UTC. Regarding the relationship with the modeled moisture content, it was concluded that the best model is the one that uses dead maritime pine branches, from 3 cm to 5 cm in diameter, classified as 100h fuels, the modelling parameters for 100h fuels and that the values of the moisture content of the fuel stick are always lower than the modeled moisture content.

Keywords: fires; forest fuels; moisture; FWI; fuel stick.

ÍNDICE GERAL

ÍNDICE DE TABELAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	viii
LISTA DE SIGLAS / ABREVIATURAS	ix
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Risco de Incêndio	4
2.2 Combustíveis florestais e o seu teor de humidade.....	8
3 CASO DE ESTUDO: MONITORIZAÇÃO EM CONTÍNUO DO RISCO DE INCÊNDIO NA ZONA DE VISEU	13
3.1 Local e períodos de medição.....	13
3.2 Metodologia de medição do TH	15
3.2.1 Medição pontual do TH de combustíveis	15
3.2.2 Sensor de vareta (fuel stick)	15
3.2.3 Células de carga.....	17
3.2.4 Teor de humidade do solo	18
3.3 Dados meteorológicos	20
3.4 Resultados	21
3.4.1 Caracterização meteorológica do período em estudo	21
3.4.2 Caracterização dos índices de perigo de incêndio no período em estudo 23	
3.4.3 Caracterização da ocorrência de incêndios no período em estudo	28
3.4.4 Monitorização do teor de humidade de um <i>fuel stick</i>	29
3.4.5 Monitorização do TH em campo através de uma balança com células de carga 30	
3.4.6 Monitorização do TH do solo	33
3.4.7 Modelação do TH dos combustíveis florestais	36
3.4.8 Relações entre os dados do <i>fuel stick</i> e o risco de incêndio	37
4 CONCLUSÃO	44
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1: Descrição dos índices constituintes do FWI (IPMA, 2023c; NRC, 2023; Wagner, 1987).....	5
Tabela 2: Classes de perigo de incêndio dos índices FFMC, DMC, DC, ISI e BUI (ICNF, sem data).....	6
Tabela 3: Classes do Índice Meteorológico de Incêndio FWI usados em Portugal (IPMA, 2023a).	6
Tabela 4: Características da estação meteorológica Viseu/Aeródromo do IPMA.	20
Tabela 5: Parâmetros meteorológicos medidos no período entre 22 de maio e 31 de outubro.....	23
Tabela 6: Valores máximos e médios dos índices de perigo de incêndio diários medidos no período entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023.....	27
Tabela 7: Comparação entre os valores medidos pelo fuel stick e os valores de TH de ramos mortos de pinheiro-bravo de diferentes dimensões.	30
Tabela 8: Comparação entre os valores medidos através de uma balança com células de carga e medições do TH em laboratório	32
Tabela 9: Coeficientes de correlação de Pearson e interpretação usada na análise de dados.....	38
Tabela 10: Coeficientes de correlação de Pearson entre os índices de perigo de incêndio horários do sistema canadiano e o TH do fuel stick para diferentes períodos de medição do TH.....	38
Tabela 11: Coeficientes de correlação de Pearson entre os índices de perigo de incêndio diários do sistema canadiano e o TH do fuel stick para diferentes períodos de medição do TH.....	39
Tabela 12: Classificação do risco de incêndios de acordo com o índice FWI do sistema canadiano e o TH do <i>fuel stick</i> com os dados do mês de agosto	40
Tabela 13: Coeficientes de correlação de Pearson entre a ocorrência de incêndios e o TH do <i>fuel stick</i> para diferentes períodos de medição do TH	40
Tabela 14: Coeficientes de correlação de Pearson entre o TH modelado e o TH do <i>fuel stick</i> para diferentes períodos de medição do TH	42

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Estrutura do Índice Meteorológico de Risco Incêndio FWI (<i>Fire Weather Index</i>). (Fonte: IPMA, 2023b; Wagner, 1987)	5
Figura 2: Localização da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV) e dos equipamentos de medição de TH, <i>fuel stick</i> e balança. (Fonte: Google Earth).....	13
Figura 3: Localização e área envolvente dos equipamentos de medição do TH dos combustíveis florestais, <i>fuel stick</i> e balança na ESTGV.....	14
Figura 4: <i>Fuel stick</i> (Fonte: <i>Campbell Scientific</i>)	16
Figura 5: Troncos de <i>Pinus Pinaster</i> de diferentes diâmetros usados para validação dos dados do <i>fuel stick</i>	16
Figura 6: Balança com as duas células de carga e os combustíveis finos e combustíveis médios utilizados para a determinação do TH.	18
Figura 7: Ensaio de validação dos sensores de humidade do solo (sensores identificados a vermelho e azul na primeira imagem).	19
Figura 8: Sensores de determinação de humidade do solo.....	20
Figura 9: Localização da estação meteorológica Viseu/Aeródromo. (Fonte: Google Earth).....	21

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Temperatura e humidade relativa média diária no período entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023.....	22
Gráfico 2: Velocidade do vento média diária e precipitação acumulada diária no período entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023.	22
Gráfico 3: Índice FFMC diário e horário medidos no período entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023.....	24
Gráfico 4: Índices DMC e DC horários e diários medidos no período entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023.....	25
Gráfico 5; Índices ISI e BUI horários e diários medidos no período entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023.....	26
Gráfico 6: Índice FWI horário e diário medidos no período entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023.....	27
Gráfico 7: Número de ocorrências de incêndios e áreas ardidadas entre 21 de maio e 18 de setembro de 2023 em Portugal.	28
Gráfico 8: TH do <i>fuel stick</i> medido no período entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023.	29
Gráfico 9: Medições do TH do <i>fuel stick</i> e do TH de combustíveis médios.	30
Gráfico 10: Medições do TH de combustíveis finos através de uma balança com células de carga e medições de validação.....	32
Gráfico 11: TH do solo medido pelos sensores a 10cm e a 20 cm de profundidade. ...	34
Gráfico 12: Ensaio de validação de dados dos sensores de humidade do solo.	35
Gráfico 13: Ensaio de validação de dados dos sensores de humidade do solo.	35
Gráfico 14: Modelação do TH dos combustíveis florestais finos, regulares e médios .	37
Gráfico 15: Modelação do TH dos combustíveis florestais de 1h, 10h e 100h	37
Gráfico 16: Relação entre o índice FWI do sistema canadiano e o TH do <i>fuel stick</i> com os dados do mês de agosto.....	39
Gráfico 17: Relação entre a ocorrência de incêndios e o TH do <i>fuel stick</i>	41
Gráfico 18: Evolução do TH modelado com dados de ramos de pinheiro-bravo morto e o TH do <i>fuel stick</i> para o período entre julho e agosto.....	43
Gráfico 19: Relação entre o TH obtido por modelação e o TH do <i>fuel stick</i>	43

LISTA DE SIGLAS / ABREVIATURAS

ANEPC – Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil

BUI – *Buildup Index*

CEIF – Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais

CEMS – *Copernicus Emergency Management Service*

DC – *Drought Code*

DMC – *Duff Moisture Code*

ECMWF – *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*

ESTGV – Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu

FFMC – *Fine Fuel Moisture Code*

FWI – *Fire Weather Index*

ICNF – Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas

ICRIF – Índice Combinado de Risco de Incêndio Florestal

ISI - *Initial Spread Index*

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

IREPI – Índice de redução da evapotranspiração para o perigo de incêndios

NDVI - *Normalized Difference Vegetation Index*

NFDRS – National Fire Danger Rating System

NRC – *Natural Resources Canada*

RCM – Risco Conjuntural e Meteorológico

TH – Teor de Humidade

UTC – *Coordinated Universal Time*

VWC – *Volume Water Content*

1 INTRODUÇÃO

A floresta constitui uma das maiores riquezas naturais do nosso País, proporcionando empregos e condições ambientais e paisagísticas únicas. A floresta está sujeita a inúmeros perigos e, em países de clima semelhante ao nosso, com verões quentes e secos, por vezes prolongados, os incêndios florestais constituem a principal ameaça para a floresta.

Tal como se tem verificado globalmente, também em Portugal se começam a sentir as consequências das alterações climáticas. Exemplo dessas consequências são o aumento de ondas calor e de períodos de seca, mais frequentes e mais prolongados, o que por sua vez tende a aumentar significativamente o risco de incêndio e os efeitos dos incêndios florestais, sendo estes considerados uma das catástrofes naturais mais graves no nosso país (ANEPC, 2023).

Dados do 6º Inventário Florestal Nacional (IFN6) referente a 2015 (ICNF, 2019), indicam que cerca de 69% do território nacional continental estava coberto por espaço florestal, contemplando matos, floresta e terrenos improdutivos. Em Portugal continental a floresta organiza-se em quatro formações florestais: os pinhais (compostos por pinheiro-bravo e pinheiro-manso), folhosas perenifólias (constituídas por montados, sobreirais e azinhais), folhosas caducifólias (formadas por carvalhos, castanheiros e outras espécies florestais) e folhosas silvo-industriais (sendo exemplo os eucaliptais).

Com mais de 1 000 000 ha, a floresta de folhosas perenifólias representa cerca de 1/3 da floresta continental, seguida dos pinhais que ocupam 900 mil ha e dos eucaliptais que ocupam 844 mil ha. A formação florestal menos significativa em área ocupada corresponde à floresta de caducifólias (carvalhos, castanheiros e outras espécies autóctones). Apesar do crescimento da área de pinheiro manso, registada em 2015, foi igualmente assinalado um decréscimo da área ocupada pelo pinheiro-bravo, essencialmente devido aos pinhais afetados por incêndios e pragas. Em contrapartida, os eucaliptais ao longo dos últimos 50 anos têm registado um aumento sistemático na floresta portuguesa (ICNF, 2019).

Distintamente do panorama continental, segundo o IFN6 (ICNF, 2019), no ano de 2015 a formação florestal que dominava na região centro era de pinhal e outras resinosas, com 486,7 mil ha, dos quais 460,0 mil ha eram representados por pinheiro-bravo e 7,7 mil ha por pinheiro manso, sendo os eucaliptais o segundo tipo de formações florestais mais presentes na região, com 439,7 mil ha. Quanto à floresta de folhas perenifólias, a mais representativa no continente, na região centro apenas se contabilizaram 60,6 mil ha, área inferior à da floresta de folhosas caducifólias, de 96,2 mil ha. A formação florestal menos representativa na região centro em 2015 era a das acácias, com apenas 6,8 mil ha.

Em Portugal, a partir da segunda metade do século XX, o número de incêndios florestais e áreas ardidas aumentaram significativamente devido a mudanças sociais da população, essencialmente relacionadas com a industrialização e com a emigração. Estas mudanças, para além de aspetos demográficos, sociais e culturais, alteraram também os setores económicos, nomeadamente o setor primário e as atividades agroflorestais e pastoris associadas às atividades agrícolas com intervenção direta na floresta, contrariamente ao aumento das atividades económicas dos setores industrial e de serviços. Em consequência dessas mudanças, o despovoamento das zonas rurais e o envelhecimento da população, que levaram à redução da mão-de-obra rural intensiva e ao aumento dos salários devido à sua escassez, a facilidade de acesso a fertilizantes artificiais, que substituíram o estrume tradicional dos animais de pastoreio, e a redução do consumo de lenha, resultante da eletrificação e utilização do gás, contribuíram para o aumento gradual e contínuo da biomassa disponível nas florestas e consequentemente o risco e os efeitos dos incêndios florestais (Bento-Gonçalves et al., 2011).

O ano de 2017 ficou marcado em Portugal devido à elevada área ardida e aos danos materiais e humanos causados pelos grandes incêndios de junho e de outubro, com cerca de 500 000 ha de área ardida e com um elevado número de mortes e de estruturas afetadas. De destacar que, os incêndios registados no mês de outubro, ocorreram na sequência de um longo período de elevadas temperaturas e de seca extrema. Este cenário já tinha sido verificado em Portugal, nomeadamente em 2003 e 2005, onde também ocorreram ondas de calor significativas que atingiram Portugal e que resultaram num elevado número de incêndios e em áreas ardidas significativas.

No período compreendido entre 1 de janeiro e 15 de outubro de 2023, foram registados na base de nacional de incêndios rurais 7 635 incêndios rurais, totalizando 34 420 ha de área ardida (19 281 ha de povoamentos, 12 994 ha de matos e 2 145 ha de área agrícola). Comparativamente com a última década, o ano de 2023 regista menos de 43% de incêndios rurais e menos 72% de área ardida, no que respeita à média anual do mesmo período. Segundo o ICNF, até 15 de outubro de 2023 os incêndios mais frequentes foram os incêndios com área ardida inferior a 1 ha (85% dos incêndios rurais). Relativamente a grandes incêndios (área ardida total igual ou superior a 100 hectares) foram registados 39 incêndios que resultaram em 23 859 ha de área ardida (69% do total ardido). Para este período salientam-se ainda 4 incêndios de maiores dimensões cujas áreas ardidas foram iguais ou superiores a 1000 ha (DNGPFR, 2023). Comparativamente com o período homólogo do ano de 2022, no qual a Divisão de Gestão do Programa de Fogos rurais registou um total de 10 449 incêndios rurais, cuja área ardida correspondeu a 110 007 ha (54 801 ha de povoamentos, 44 114 há

de matos e 11 092 há de agricultura) (DNGPFR, 2022), no ano de 2023 verificou-se um redução de ocorrências de cerca de 37%.

Um dos principais fatores que determina o risco de incêndio florestal é o teor de humidade (TH) dos combustíveis florestais dado que influencia quase todos os fatores relacionados com o desenvolvimento do incêndio, como o seu potencial e tempo de ignição, intensidade, velocidade de propagação, consequências e extensão do incêndio e dificuldade de extinção (Blackmarr, 1972; Dimitrakopoulos & Papaioannou, 2001; Rothermel, 1972; D. Viegas et al., 1992; Wagner, 1987). Assim, a correta avaliação do TH dos combustíveis florestais permite melhorar os sistemas de alerta e a caracterização da propagação de um incêndio.

Tradicionalmente, em Portugal, o risco de incêndio dinâmico é dado através do Índice meteorológico de perigo de incêndio (FWI) desenvolvido pelos Serviços Florestais Canadianos. Através da utilização deste índice é possível estimar um risco de incêndio a partir da simulação do TH dos diversos combustíveis presentes no solo florestal, sendo este determinado indiretamente através de observações meteorológicas, no entanto, a aplicação desta metodologia não deixa de ser uma estimativa indireta das condições de secura de combustíveis florestais, sendo, assim, importante desenvolver metodologias expeditas que permitam a medição dessas condições em campo.

Desta forma, o objetivo central do presente trabalho é o desenvolvimento de métodos de medição de parâmetros ambientais e florestais que permitam monitorizar em contínuo o risco de incêndio de uma determinada região de forma expedita e fiável, com representatividade temporal e espacial e a um custo mais reduzido do que os métodos atuais, nomeadamente com a utilização de sensores de vareta (*fuel stick*), sensores de humidade do solo e células de carga para uma monitorização em contínuo da variação do TH de uma amostra de combustível florestal. Os métodos testados foram depois comparados com indicadores do perigo de incêndio e com os valores das ocorrências e área ardida dos incêndios florestais.

No que se refere à estrutura de apresentação, o presente trabalho segue o modelo clássico de organização deste tipo de documento. Depois de apresentada uma introdução ao tema estudado e quais os objetivos do trabalho, será feita uma descrição sobre o estado da arte dos temas abordados, será dada uma explicação sobre a metodologia utilizada, apresentados e discutidos os resultados obtidos e feita uma conclusão sobre todo o trabalho realizado.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Risco de Incêndio

O risco de incêndio é habitualmente descrito como o resultado da interação entre os fatores constantes (combustível ou topografia) e os fatores dinâmicos (meteorologia) que afetam a ignição, a propagação e a dificuldade de controlo de um incêndio, assim como a minimização dos danos causados (D. X. Viegas et al., 2011).

Relativamente aos fatores dinâmicos, é sabido que os incêndios rurais são afetados em todas as suas fases pelas condições meteorológicas, desde a ignição, propagação até à sua extinção e que o risco de incêndio é condicionado, em grande parte, pelas condições meteorológicas, podendo ser calculado de uma forma objetiva através de métodos de indexação existentes (D. Viegas et al., 2004).

Como resultado da investigação feita ao redor do efeito das condições meteorológicas nos incêndios florestais, desde há muito tempo que são desenvolvidos vários métodos de avaliação do risco de incêndio meteorológico, sendo que a maioria destes métodos se baseiam em abordagens empíricas ou semi-empíricas (D. Viegas et al., 1999).

J. G. Wright, em 1925 no Canadá, iniciou a pesquisa sobre o risco de incêndio florestal e desde então foram desenvolvidas várias metodologias de cálculo do risco de incêndio com aplicabilidade não só no Canadá mas por todo o mundo. Em 1969, o sistema canadiano em uso baseava-se já em 7 características, nomeadamente:

1. Leituras meteorológicas às 12h00, de precipitação, humidade relativa e velocidade do vento (sendo mais tarde adicionada a temperatura do ar);
2. Índices de perigo de incêndio adaptados às diferentes épocas do ano;
3. TH do combustível fino, estimado diariamente tendo como ponto de partida o valor estimado no dia anterior;
4. Efeitos climáticos a longo prazo, medidos por um índice de seca;
5. Mistura de humidificação e de secura de combustíveis finos, para originar o perigo de incêndio com cinco classes (nulo, baixo, moderado, alto e extremo);
6. Correlação entre o efeito do vento no comportamento do fogo;
7. Índices de perigo auxiliares para cada tipo específicos de combustível.

Nos anos que se seguiram, os Serviços Florestais Canadianos desenvolveram um novo índice, o Índice Meteorológico de Risco de Incêndio (FWI), culminando com a sua publicação em 1987 (Wagner, 1987).

A estrutura do FWI é constituída por três níveis, conforme se encontra esquematicamente representada na Figura 1, nomeadamente as observações

meteorológicas, os índices de TH e índices de comportamento do fogo. Na Tabela 1 encontram-se descritos os seis índices que resultam da estrutura do FWI.

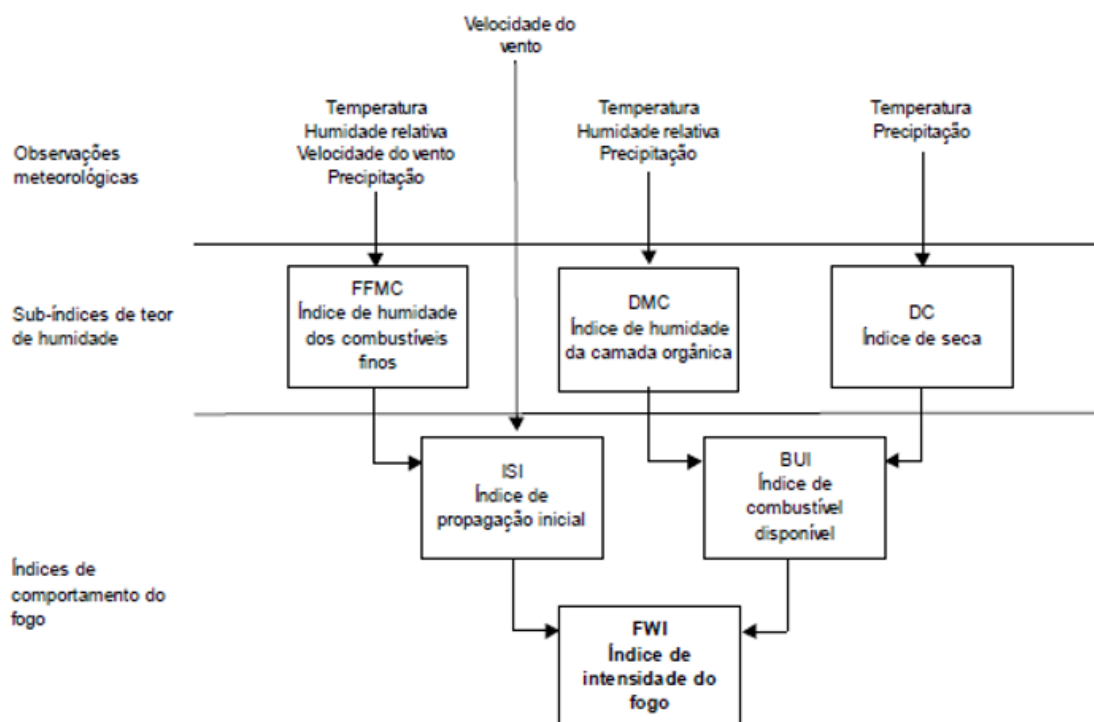


Figura 1: Estrutura do Índice Meteorológico de Risco Incêndio FWI (*Fire Weather Index*). (Fonte: IPMA, 2023b; Wagner, 1987)

Tabela 1: Descrição dos índices constituintes do FWI (IPMA, 2023c; NRC, 2023; Wagner, 1987).

Índice	Descrição
FFMC	Índice de Humidade dos Combustíveis Finos (<i>Fine Fuel Moisture Content</i>) - Representa o TH dos combustíveis finos mortos na camada superficial até 2 cm de profundidade e reflete as condições meteorológicas nos últimos 2 a 3 dias. É um Indicador da facilidade de ignição e de incidência de focos secundários.
DMC	Índice de Húmus (<i>Duff Moisture Code</i>) - Representa o TH dos combustíveis médios mortos na camada entre 5 a 10 cm de profundidade, pouco compactada. É um indicador da facilidade de eliminação do combustível.
DC	Índice de Seca (<i>Drought Code</i>) - Representa o TH dos combustíveis grossos mortos entre 10 a 20 cm de profundidade, numa camada de maior compactação. É um indicador da necessidade de rescaldo, de potencial reacendimento e de fogo subterrâneo. É também frequentemente usado como um método para contabilizar o efeito acumulado da seca anual.
BUI	Índice de Combustível Disponível (<i>Buildup Index</i>) - Representa a carga de combustível disponível para a combustão. É baseado no DMC e no DC.
ISI	Índice de Propagação Inicial (<i>Initial Spread Index</i>) - Representa a velocidade inicial de progressão do fogo. É baseado na velocidade do vento e no FFMC.
FWI	Índice Meteorológico de Incêndio (<i>Fire Weather Index</i>) - Representa a intensidade da frente de fogo, definida como a libertação de energia por unidade de comprimento da frente de chamas. Baseia-se no ISI e no BUI e é usado como um índice geral de perigo de incêndio.

As classes de perigo de incêndio florestal aplicadas em Portugal são exibidas na Tabela 2 para os índices FFMC, DMC, DC, ISI e BUI, conforme as classificações usadas pelo ICNF. Na Tabela 3, são definidas as classes do FWI com base na classificação utilizada pelo IPMA. Tendo em conta que o aumento de cada um dos índices corresponde ao aumento de

perigo de um incêndio, e que a intensidade do FWI é variável, a classificação do FWI divide-se em 7 classes, desde um perigo baixo ou reduzido até um perigo excepcional (IPMA, 2023b).

Tabela 2: Classes de perigo de incêndio dos índices FFMC, DMC, DC, ISI e BUI (ICNF, sem data).

Classes de perigo	FFMC	DMC / DC	ISI	BUI
Baixo	<74	<300	<3	0 – 30
Moderado	74 – 82	-	-	50 – 60
Elevado	82 – 91	300 – 500	<10	100
Muito Elevado	91 – 94	>500	10 – 15	-
Extremo	94 – 96	-	>15	-
Excepcional	≥97	-	>30	-

Tabela 3: Classes do Índice Meteorológico de Incêndio FWI usados em Portugal (IPMA, 2023a).

Classe do Perigo	Classes	Tipo de fogo
Baixo ou Reduzido	FWI < 8.2	Fogo de superfície
Moderado	8.2 ≤ FWI < 17.2	
Elevado	17.2 ≤ FWI < 24.6	Fogo de elevada intensidade com fogo de copas
Muito Elevado	24.6 ≤ FWI < 38.3	
Máximo	38.3 ≤ FWI < 50.1	Fogo de extrema intensidade com fogo de copas ativos, focos secundários muito prováveis e elevada dificuldade de controlo
Extremo	50.1 ≤ FWI < 64	Fogo de excepcional intensidade com extrema dificuldade de controlo do incêndio
Excepcional	FWI ≥ 64	

Uma vez que o FWI é uma conjugação da velocidade de propagação (ISI) com o indicador de combustível disponível (BUI), poderia apenas ser considerado como um índice de intensidade de propagação do fogo, no entanto, uma vez que são também parte integrante deste os índices relativos à humidade dos combustíveis finos, considera-se que o FWI é também um bom indicador da facilidade de ignição do fogo. Assim, este índice constitui também um indicador que se relaciona quer com a possibilidade de ocorrência de incêndios quer com a sua perigosidade (D. Viegas et al., 2004).

Devido à sua facilidade de utilização, já que apenas necessita de dados de estações meteorológicas que se encontram facilmente disponibilizados, em 1995 foi emitida uma recomendação por parte da Comissão Europeia no sentido em que os países adotassem um método de indexação do perigo de incêndio comum, o FWI. A utilização de um único sistema facilitaria o reconhecimento, interpretação e intercâmbio de dados entre os estados membro (D. Viegas et al., 2004).

Desde 2002 que o IPMA calcula diariamente este índice, utilizando os parâmetros meteorológicos temperatura do ar, humidade relativa do ar e intensidade do vento observados e previstos para as 12h00 UTC (*Coordinated Universal Time*) e precipitação acumulada nas últimas 24 horas (IPMA, 2020). No cálculo dos índices acima descritos, são utilizados os parâmetros meteorológicos das previsões dos modelos de previsão numérica do Centro

Europeu de Previsões Meteorológicas a médio prazo (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF*) (IPMA, 2023a).

Quando se pretende aplicar um método de determinação de risco de incêndio a uma determinada região, deve ser feita previamente uma calibração tendo em consideração as características climáticas, o histórico e gestão de incêndios e a estrutura de combate e prevenção de incêndios dessa mesma região. Neste sentido, em D. Viegas et al., 2004 desenvolveu estudos de adaptação do sistema canadiano, em particular o FWI, à realidade de Portugal. O FWI tem, no entanto, algumas limitações quando aplicado a regiões diferentes daquela que motivou a sua formulação, ou seja, não fornece um valor quantitativo real do TH das espécies florestais que pretende representar, apresentando também uma resolução temporal diária que poderá ser insuficiente quando ocorrem variações significativas das condições meteorológicas ao longo do dia. Desta forma, estas desvantagens criam algumas dificuldades quando se pretende combinar este índice com outras variáveis de comportamento e de risco de incêndio. Desta forma é importante continuar a desenvolver metodologias que complementem, ou mesmo substituam, o cálculo do risco de incêndio baseado em medições meteorológicas, e que traduzam, efetivamente, o estado de secura dos combustíveis florestais com uma resolução espacial e temporal apropriada.

Tendo em conta que o valor diário mais importante na avaliação do risco de incêndio é o valor máximo diário e que este ocorre por volta do meio do dia, habitualmente os parâmetros meteorológicos usados no FWI são os observados às 12h00 UTC (correspondente às 13h00 no horário de verão), com exceção da precipitação diária acumulada. Porém, é possível efetuar o cálculo de qualquer sub-índice em qualquer horário, podendo até analisar-se a sua variação ao longo do dia (D. Viegas et al., 2004)

Em Portugal, para além do FWI, o IPMA calcula também diariamente o Risco Conjuntural e Meteorológico (RCM). Este índice é calculado pela combinação de dois outros índices: o FWI e o "índice de perigosidade de incêndio rural". Este último índice integra elementos da responsabilidade do ICNF, sendo eles um elemento estrutural de periodicidade decadal e um elemento conjuntural anual, que tem em conta as áreas aridas do último triénio. A assimilação destes dois índices é feita pela aplicação de uma matriz de ponderação de risco (IPMA, 2020). Diariamente o IPMA disponibiliza cartas de RCM observado e cartas de RCM previsto para as seguintes 24h, 48h, 72h, 96h e 120h (IPMA, 2023c).

O Índice Combinado de Risco de Incêndio Florestal (ICRIF) foi outro dos métodos que teve mais utilização em Portugal e combinava o índice FWI com o tipo e condições da vegetação. Este índice representava um risco conjuntural, determinado através da combinação ponderada do risco meteorológico FWI, do risco estrutural associado ao

combustível, ou seja, um indicador da facilidade de combustão de um incêndio florestal e da sua propagação (mapa de combustível), e do índice de vegetação NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), indicador do estado de stress em que se encontra a vegetação, sendo também necessário para o seu cálculo um mapa de risco estrutural

Existem ainda outros métodos de risco de incêndio aplicados em diferentes regiões e/ou países, tais como: o índice de Risco Numérico (França) com utilização dos valores diários dos fatores meteorológicos de temperatura, humidade relativa do ar, nebulosidade, velocidade do vento e um valor inicial de concentração de água no solo; o índice IREPI (Itália) com utilização dos valores médios diários da temperatura, humidade relativa do ar, velocidade do vento, insolação e precipitação; o índice ICONA (Espanha) baseado na temperatura e humidade relativa do ar, medidas às 12h00 UTC (D. Viegas et al., 1999); ou o NFDRS - National Fire Danger Rating System (Estados Unidos da América), sendo este um conjunto de índices que permitem quantificar o perigo e avaliar o potencial de um incêndio. Neste sistema os combustíveis florestais mortos são categorizados por classes de resposta à humidade de 1h, 10h, 100h e 1000 h, representadas pela espécie *Pinus ponderosa* com diâmetros que variam entre 0,64 cm a 25,4 cm. No NFDRS são muito utilizados combustíveis com tempo de resposta de 10 horas, já que, teoricamente, estes combustíveis, em condições normais, ganham ou perdem humidade de uma forma exponencial a uma taxa tal que após 10 h a humidade trocada corresponde a 63% da diferença entre os teores de humidade inicial e de equilíbrio.

2.2 Combustíveis florestais e o seu teor de humidade

Um combustível florestal pode definir-se como um material orgânico vivo ou morto, com potencial de ser consumido num incêndio florestal, tratando-se de um dos principais fatores para o desenvolvimento do fogo e o único destes que pode ser alterado pela ação do homem. As propriedades dos combustíveis florestais têm uma grande importância na evolução dos incêndios na medida em que influenciam a sua ignição, velocidade de propagação, intensidade e dificuldade de combate.

As principais propriedades dos combustíveis florestais, e que influenciam a evolução dos incêndios são: o estado vegetativo (e.g. combustíveis mortos e vivos), a sua posição no complexo florestal (e.g. combustíveis subterrâneos, superfície e aéreos), o seu tamanho (combustíveis finos, regulares, médios e grossos), a sua forma, a sua densidade, o tempo de resposta ou tempo de retardação à humidade (combustíveis de 1h, 10h, 100h e 1000h), a sua composição química e TH e, conseqüentemente, a sua inflamabilidade e combustibilidade; (D. X. Viegas et al., 2011).

Relativamente ao estado vegetativo, posição no complexo florestal e tamanho, salientam-se os combustíveis florestais finos mortos, principalmente os localizados na superfície da manta morta florestal, que são normalmente os principais responsáveis por iniciarem e alimentarem os incêndios florestais de superfície. Este tipo de combustíveis determina em larga escala a velocidade e a intensidade de propagação do incêndio, sendo o seu TH determinante para a ignição, criação de focos secundários e propagação dos incêndios (D. X. Viegas et al., 2019).

Relativamente ao TH dos combustíveis, a variação de humidade dos combustíveis florestais mortos relaciona-se com os processos físicos de evaporação, condensação, adsorção, dessorção, e com a existência de eventos de precipitação e de inundação do solo (S. M. G. Lopes, 2014).

O facto dos combustíveis finos mortos apresentarem rápidas alterações do seu TH, assim como a sua elevada relação superfície/volume e carga combustível, faz com que estes apresentem uma correlação significativa com os índices de perigo de incêndio e com a ocorrência de incêndios (S. M. G. Lopes, 2014).

Quanto à dimensão dos combustíveis, estes podem ser classificados conforme o seu diâmetro, que está diretamente relacionado com a rapidez de resposta às alterações ambientais, isto é, com o seu tempo de resposta à humidade. Assim, os combustíveis podem ser classificados como combustíveis finos ou de 1h (diâmetro <0,6 cm), combustíveis regulares ou de 10h (diâmetro >0,6 cm <2,5 cm), combustíveis médios ou de 100h (diâmetro >2,5 cm <7,5 cm) e combustíveis grossos ou de 1000h (diâmetro >7,5 cm) (D. X. Viegas et al., 2011).

No que se refere à determinação do TH de combustíveis florestais, existem diversos métodos como a amostragem de combustíveis florestais em campo e determinação do TH em laboratório, a determinação do TH em campo, a utilização de sensores de vareta (*fuel stick*), a utilização de sensores do TH do solo, a utilização de parâmetros meteorológicos, a aplicação de técnicas de deteção remota para estimativa do TH, entre outras metodologias. A amostragem e determinação do TH em laboratório é uma metodologia dispendiosa e trabalhosa se tiver como objetivo uma boa representatividade espacial e temporal, no entanto, é a que garante um melhor resultado de caracterização do TH.

No que respeita às metodologias de determinação do TH diretamente em campo, excluindo a utilização de *fuel sticks*, esta não tem sido uma metodologia usual, principalmente pelos custos que envolve, já que necessita a deslocação de meios humanos e equipamentos frequentemente para o campo. Desta forma, o desenvolvimento de sistemas que monitorizem

diretamente o TH dos combustíveis em campo é ainda uma área com alguma possibilidade de desenvolvimento.

A utilização de sensores de vareta, como *fuel sticks*, produz resultados satisfatórios para a caracterização de combustíveis florestais mortos, nomeadamente combustíveis regulares e médios, não sendo, no entanto, aplicável aos combustíveis vivos. Usualmente estes são concebidos para simularem combustíveis de 10 horas (com diâmetro de aproximadamente 1 cm), os quais recolhem e transmitem os dados de TH de forma automática, contínua e em tempo real.

Cawson et al., 2020a analisou o comportamento dos *fuel sticks* como forma de estimar o TH dos combustíveis mortos da superfície do solo, tendo concluído que estes mostram uma relação satisfatória, mas apenas após calibração e que a melhor forma de usar este tipo de equipamento é como um valor indicativo. Cawson et al., 2020a, verificou que o TH dos combustíveis mortos da superfície era muito superior ao TH do *fuel stick*, exceto em situações de TH baixos, nomeadamente em zonas com camadas folhosas pouco profundas em que o TH dos combustíveis mortos era por vezes inferior ao TH do *fuel stick*.

Relativamente à estimativa do TH dos combustíveis florestais através da utilização de sensores do TH do solo, são habitualmente usados sensores que determinam o teor volumétrico da água (VWC) no solo, sendo este definido como a razão entre o volume de água num determinado volume de solo e o volume total do solo, expresso como uma percentagem.

Em alguns estudos, têm sido encontradas boas relações entre as medições do TH do solo e o DC, indicando que esta metodologia pode ser adequada para avaliar a secura das camadas mais profundas da manta morta assim como dos combustíveis de maior diâmetro. No estudo desenvolvido por Hanes et al., 2023 foram utilizadas sensores de TH do solo com o objetivo de determinar quão bem o DC se correlaciona com a humidade do solo e a que profundidades é que isso acontece. Neste estudo, os sensores foram instalados a duas profundidades, 10 e 18 cm, sendo o TH do solo sido registado numa base horária. Hanes et al., 2023 verificou que o DC apresentou uma boa correlação com a humidade do solo a 10 e 18 cm, com valores mínimos de R^2 de 0,46 e RMSE entre 6 e 16%.

A estimativa do TH de combustíveis florestais através da utilização de parâmetros meteorológicos e de outros parâmetros que alimentam modelos empíricos, semi-empíricos ou físicos é vantajosa no que respeita à integração de variáveis que para além de definirem o risco de incêndio, são também importantes no que respeita à propagação e extinção dos incêndios florestais, além de poder ser usada como uma ferramenta de previsão e não apenas como uma ferramenta de descrição, no entanto, esta metodologia não mede diretamente o

estado da vegetação, sendo também aplicável principalmente a combustíveis florestais mortos. Desta forma, salientam-se os trabalhos desenvolvidos pelos Serviços Florestais Canadianos no que respeita ao Índice Meteorológico de Risco de Incêndio (FWI), culminando com a sua publicação em 1987 (Wagner, 1987), assim como os modelos desenvolvidos por Nelson, R.M.(2000), Matthews (2006), S. Lopes et al.(2014) e S. Lopes et al.(2022).

Relativamente à aplicação de técnicas de deteção remota, esta é uma metodologia adequada para uma representatividade espacial e temporal mais extensa. Ao longo dos últimos anos foram desenvolvidos diversos algoritmos que permitem a obtenção de informação fundamental para a gestão dos incêndios com base nos produtos dos sistemas de deteção remota, onde se inclui a monitorização do TH de combustíveis florestais vivos (D. X. Viegas et al., 2011). A maioria dos estudos tem-se baseado em imagens NOAA-AVHRR e atualmente em sensores tais como SPOT-Vegetation e Terra-MODIS (S. M. G. Lopes, 2014). A utilização de deteção remota tem obviamente algumas restrições. A primeira prende-se com o facto das técnicas requererem alguma capacidade computacional e, portanto, adequadas para análises *a posteriori*, sem uma vertente operacional. Outra desvantagem prende-se com a dificuldade da análise do TH dos combustíveis mortos, centrando-se essencialmente nos combustíveis vivos. No âmbito do presente estudo não foram desenvolvidos trabalhos com a aplicação de técnicas de deteção remota.

Na região centro de Portugal a manta morta é essencialmente constituída por folhada de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) e de pinheiro-bravo (*Pinus pinaster*), pelo que se dá especial importância ao estudo destas espécies. Contudo, é igualmente importante destacar alguns combustíveis arbustivos como a urze (*Calluna vulgaris*), carqueja (*Chamaespartium tridentatum*), Tojo (*Ulex europaeus*), entre outras, também bastante representadas na região centro (D. X. Viegas et al., 2019).

Desde 1987 que existe no Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF) um projeto no qual são realizadas diariamente medições do TH de determinados combustíveis finos que representam a floresta na região centro de Portugal. O local de amostragem é o aeródromo da Lousã sendo as amostras recolhidas, durante o período seco, diariamente entre as 12h00 e as 13h00 locais e analisadas no Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF), situado no próprio aeródromo. Ao longo do tempo as espécies monitorizadas que se têm mantido devido à sua importância e representatividade são a caruma de *Pinus pinaster* e as folhas mortas de *Eucalyptus globulus*, ambas representativas de combustíveis finos arbóreos, e as folhas e extremidades de ramos de *Calluna vulgaris* e de *Chamaespartium tridentatum*, ambas representativas dos combustíveis finos arbustivos (D. Viegas et al., 2004)

Pontualmente este procedimento tem sido estendido para outras zonas do país, tal como aconteceu na execução do projeto MCFire - Medição do teor de humidade de combustíveis florestais e avaliação do seu comportamento face às novas realidades climáticas (Projeto FCT PCIF/MPG/0108/2017), onde se realizaram durante os 4 anos do projeto (2019 a 2023) medições do TH na Lousã, Viseu, Faro e Viana do Castelo.

3 CASO DE ESTUDO: MONITORIZAÇÃO EM CONTÍNUO DO RISCO DE INCÊNDIO NA ZONA DE VISEU

3.1 Local e períodos de medição

A totalidade dos ensaios realizados para o presente projeto foram concretizados em Viseu, nomeadamente, no espaço envolvente da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV). Durante as medições, o *fuel stick* e a balança com as células de carga estiveram localizados junto ao parque de estacionamento da escola, em espaço aberto, sujeitos a luz solar direta durante o período da manhã e no final da tarde e ligeiramente abrigados de no que respeita a rajadas de vento. No caso do *fuel stick*, este esteve colocado numa zona ajardinada, tendencialmente mais húmida, e colocado mais perto do edifício da escola, enquanto que a balança esteve colocada sob pavimento cimentado, mais afastado do edifício. A escolha destas localizações, e consequente aproximação ao edifício da escola, deveu-se sobretudo à necessidade de aproximação de um local com fornecimento de energia e sinal de rede WiFi (ver Figura 2 e Figura 3).



Figura 2: Localização da Escola Superior de Tecnologia e Gestão de Viseu (ESTGV) e dos equipamentos de medição de TH, *fuel stick* e balança. (Fonte: Google Earth)

Fuel stick



Balança



Figura 3: Localização e área envolvente dos equipamentos de medição do TH dos combustíveis florestais, *fuel stick* e balança na ESTGV

No que se refere aos períodos de amostragem, os ensaios aqui estudados decorreram entre 21 de maio e 31 de outubro de 2023.

Alguns dos dados utilizados no presente estudo foram obtidos previamente ao início dos trabalhos conducentes à presente tese de mestrado, nomeadamente os dados relativos ao ensaio de validação do *Fuel Stick*, medições de TH em combustíveis finos com recurso a sensores de carga e pesagens de controlo e aos teores de humidade do solo, todos eles realizados entre setembro e outubro de 2022, sendo que neste caso apenas foi realizado o tratamento dos dados a apresentação dos resultados.

3.2 Metodologia de medição do TH

Para o presente estudo de desenvolvimento de métodos de monitorização em contínuo de parâmetros ambientais e florestais que permitam monitorizar o perigo de incêndio de uma determinada região, foram efetuados os seguintes ensaios:

- Medição do TH em combustíveis finos e médios da espécie *Pinus pinaster* através de medições pontuais e medição em contínuo utilizando um sistema de pesagem com células de carga;
- Medição do TH de um *fuel stick*;
- Medição do TH do solo através de sensores de medição do TH do solo;
- Medição de parâmetros meteorológicos.

De notar que todas as medições foram efetuadas na cidade de Viseu, nomeadamente na ESTGV em períodos temporais distintos entre si e com durações igualmente distintas.

Tal como referido anteriormente, no presente estudo foi determinado o TH de combustíveis finos, combustíveis médios e do solo através de diferentes metodologias, cujos resultados foram analisados entre si e relacionados quer com os índices de risco de incêndio como com a ocorrência dos incêndios durante o período de monitorização.

Para a realização dos ensaios a seguir descritos, foi tida em consideração a época do ano, querendo-se garantir que estes decorriam durante o período de maior risco de incêndio. Sempre que possível, cumpriu-se também a amostragem e medições durante o período do dia de maior risco de incêndio, correspondente ao período de temperatura máxima e humidade relativa do ar mínima, entre as 11h00 e as 15h00.

3.2.1 Medição pontual do TH de combustíveis

Para a determinação pontual do TH de combustíveis finos e médios, utiliza-se normalmente o método gravimétrico de secagem em estufa a 105°C com pesagem inicial e final, sendo o TH calculado através da seguinte equação:

$$TH = \frac{M_i - M_f}{M_f} \times 100$$

TH – teor de humidade.

M_i – massa inicial, correspondente ao peso húmido.

M_f – massa final, correspondente ao peso seco

3.2.2 Sensor de vareta (fuel stick)

O *fuel stick* utilizado da marca *Campbell Scientific* (ver Figura 3 e Figura 4) é um sensor de humidade e temperatura feito de *Pinus ponderosa* que pretende simular combustíveis

florestais de diâmetro médio (combustíveis de 10h), emitindo resultados em percentagem de humidade por peso seco. Este sensor mimetiza o comportamento dos combustíveis uma vez que se encontra exposto às mesmas condições dos encontrados no meio natural (Campbell Scientific, 2023).

A maior vantagem deste sistema é o facto de permitir monitorizar automaticamente e à distância alterações das condições do combustível, possibilitando uma redução de visitas ao local, o que leva a uma redução de custos, ou seja, uma monitorização com menor esforço.

O equipamento utiliza a tecnologia de reflectometria no domínio do tempo (TDR) para medir o TH. O sensor produz uma frequência de onda que é lida usando um canal analógico ou de pulso num sistema de aquisição (*data logger*). Este *data logger* por sua vez converte a medição da frequência em percentagem de humidade do combustível através de um processo de calibração (Campbell Scientific, 2023).

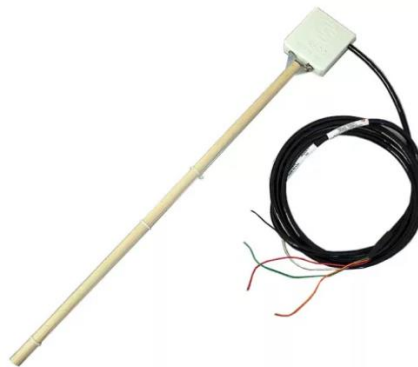


Figura 4: *Fuel stick* (Fonte: *Campbell Scientific*)

Como forma de validar os dados emitidos pelo *fuel stick*, foram realizados ensaios de comparação do TH do *fuel stick* e do TH de diferentes tipos de combustíveis (1h, 10h e 100h) da espécie *Pinus Pinaster* (ver Figura 5).



Figura 5: Troncos de *Pinus Pinaster* de diferentes diâmetros usados para validação dos dados do *fuel stick*.

3.2.3 Células de carga

Na determinação do TH em combustíveis finos e médios, foi utilizada uma balança com duas células de carga que permitiu uma monitorização em contínuo da variação da massa ao longo do tempo. A cada uma das células da balança correspondeu um ensaio com combustíveis diferentes.

As vantagens deste método prendem-se com o facto dos combustíveis estudados estarem no exterior sujeitos às alterações meteorológicas, assemelhando-se às condições a que os combustíveis estão expostos naturalmente, e ao facto de ser um sistema automatizado, permitindo uma monitorização menos dispendiosa no que toca à menor necessidade de visitas do técnico ao local.

Relativamente às células de carga foram utilizadas as células de carga L6N-C3-8kg-3B6 da Zemic Europe.

Tendo em conta que a unidade de saída dos dados deste equipamento é expressa em milivoltes (mV), foi necessário, posteriormente, converter as medições para uma unidade mássica (kg) que, por sua vez, permitiu assim determinar a percentagem do TH dos combustíveis usados.

Para que fosse possível proceder-se à conversão da voltagem para unidade mássica, inicialmente foi realizado um ensaio em ambiente controlado, nomeadamente dentro de uma câmara climática, com diferentes massas (0kg, 1kg, 3kg e 5kg) a diferentes temperaturas constantes (10°C, 20°C, 25°C e 30°C). Deste ensaio resultou uma reta de calibração e uma equação linear através da qual foi possível fazer corresponder uma determinada diferença de potencial a um valor em massa.

O combustível fino utilizado na célula de carga foi a caruma de pinheiro-bravo (*Pinus pinaster*), uma vez que esta espécie representa a principal cobertura vegetal da região centro de Portugal (D. X. Viegas et al., 2019). A caruma, previamente seca, foi colocada numa das células de carga da balança numa cesta de peso conhecido, em quantidade suficiente para simular a camada mais superficial do solo.

Enquanto decorria o ensaio, foram pontualmente efetuadas pesagens ao cesto da caruma como forma de obter medições que pudessem validar os resultados emitidos pela célula de carga.

Na célula de carga destinada aos combustíveis médios, de resposta mais lenta, foram colocados 3 troncos de diferentes tamanhos, com pesos e diâmetros conhecidos (d=7 cm; d=13,5 cm; d=17,5 cm).



Figura 6: Balança com as duas células de carga e os combustíveis finos e combustíveis médios utilizados para a determinação do TH.

Devido à ocorrência de diferentes dificuldades operacionais relacionadas com a comunicação de dados entre o sistema de aquisição e a plataforma de disponibilização de dados, com a influência da temperatura do ar nos resultados obtidos pelas células de carga e devido às sucessivas avarias dos componentes que constituíam o sistema, apenas foram obtidos dados fiáveis por períodos relativamente curtos e que se apresentam mais à frente.

3.2.4 Teor de humidade do solo

Tendo em conta que o TH do solo, principalmente as camadas superficiais é influenciado também pelos mesmos fatores que influenciam os combustíveis florestais, principalmente os de resposta mais lenta, foram também realizados ensaios de monitorização do TH do solo.

Para a realização dos ensaios de determinação de humidade no solo foram utilizados dois sensores de humidade *WaterScout SM100*, equipamento que mede o teor de volumétrico de água no solo (VWC). Cada sensor é composto por dois elétrodos que funcionam como um condensador, com o solo circundante a servir de dielétrico. O restante processo de aquisição de dados é proporcionado por um oscilador de 80 MHz que aciona o condensador (WaterScout, 2023). De seguida um sinal proporcional à permissividade dielétrica do solo é convertido no sinal de saída, dado que a permissividade dielétrica da água é muito maior do que a do ar, dos minerais do solo e da matéria orgânica. Desta forma, as alterações no teor de água são detetadas pelo circuito do sensor e correlacionadas com o TH do solo (WaterScout, sem data).

Por forma a validar os dados emitidos pelo equipamento, foi realizado um ensaio de validação com os sensores em ambiente controlado. Este ensaio decorreu dentro de uma câmara climática que garantiu as mesmas condições de temperatura e humidade relativa durante todo o processo, respetivamente, 40°C e 20%. Os sensores foram colocados numa mistura homogénea de solo, seco a 105°C, e água, cujas massas e volumes foram registados à medida que a mistura foi sendo feita e até se atingir um volume suficiente para que os

sensores pudessem ser os dois colocados em condições semelhantes. O registo das massas e volumes utilizados permitiu que posteriormente se determinasse o TH do solo no início do ensaio de validação.

Dentro da câmara climática, o solo humidificado, assim como os sensores, foram colocados num balde que por sua vez esteve continuamente preso a uma balança que monitorizou o peso do balde durante todo o ensaio. Este teste apenas foi interrompido depois de se confirmar a secura do solo através da estabilização dos valores de VWC medidos pelos sensores de humidade e através da estabilização do peso do balde.



Figura 7: Ensaio de validação dos sensores de humidade do solo (sensores identificados a vermelho e azul na primeira imagem).

O TH inicial em base húmida e base seca foi calculado a partir da massa do solo e da massa total de solo e água utilizados na mistura:

$$TH_{inicial} Base Húmida = \frac{m_{solo+água} - m_{solo}}{m_{solo+água}}$$

$$TH_{inicial} Base Seca = \frac{m_{solo+água} - m_{solo}}{m_{solo}}$$

No que se refere à determinação do teor volumétrico de água (VWC) na mistura de solo inicial, este foi determinado a partir da massa de água e do volume de solo utilizados na mistura:

$$VWC = \frac{m_{água}}{v_{solo}} \times 100$$

O facto de o equipamento utilizado na determinação do TH do solo ser constituído por 2 sensores, permitiu a avaliação da humidade a duas profundidades do solo distintas, 10cm e 20cm.



Figura 8: Sensores de determinação de humidade do solo.

Devido à existência de outros projetos de investigação para os quais os sensores de TH do solo estavam também em utilização, apenas foram obtidos dados por um período relativamente curto e que se apresenta mais à frente.

3.3 Dados meteorológicos

O cálculo do FWI depende inteiramente das condições meteorológicas registadas numa determinada região que se pretende estudar, por isso foi determinante aceder aos dados da estação meteorológica mais próxima do local onde os ensaios de determinação do TH correram.

Pela maior aproximação ao local onde decorreram os ensaios e por apresentar disponibilizada toda a informação necessária, a estação meteorológica do IPMA escolhida para o tratamento de dados foi a estação Viseu/Aeródromo (ver Tabela 4 e Figura 9). Foram adquiridos a partir desta estação os parâmetros meteorológicos temperatura, humidade relativa do ar, precipitação e velocidade do vento.

Tabela 4: Características da estação meteorológica Viseu/Aeródromo do IPMA.

Estação	Distância aprox. (km)	Número	Tipo	Coordenadas WGS84		Altitude
				Latitude	Longitude	
Viseu/Aeródromo	8,1	560	Estação Automática Principal (EMA I)	40,71492778	-7,89591667	636



Figura 9: Localização da estação meteorológica Viseu/Aeródromo. (Fonte: Google Earth)

3.4 Resultados

3.4.1 Caracterização meteorológica do período em estudo

No Gráfico 1 e Gráfico 2 são apresentados os valores médios diários dos parâmetros meteorológicos que mais influenciam o TH dos combustíveis florestais da zona em estudo, nomeadamente a temperatura e humidade relativa do ar e a velocidade do vento. No caso da precipitação é apresentado o valor acumulado diário. Estes parâmetros são também utilizados na determinação do perigo de incêndio meteorológico do sistema canadiano FWI, sendo que nesse caso são utilizados os valores medidos às 12h00 UTC e, no caso da precipitação, o valor acumulado diário das últimas 24h até às 12h00 UTC.

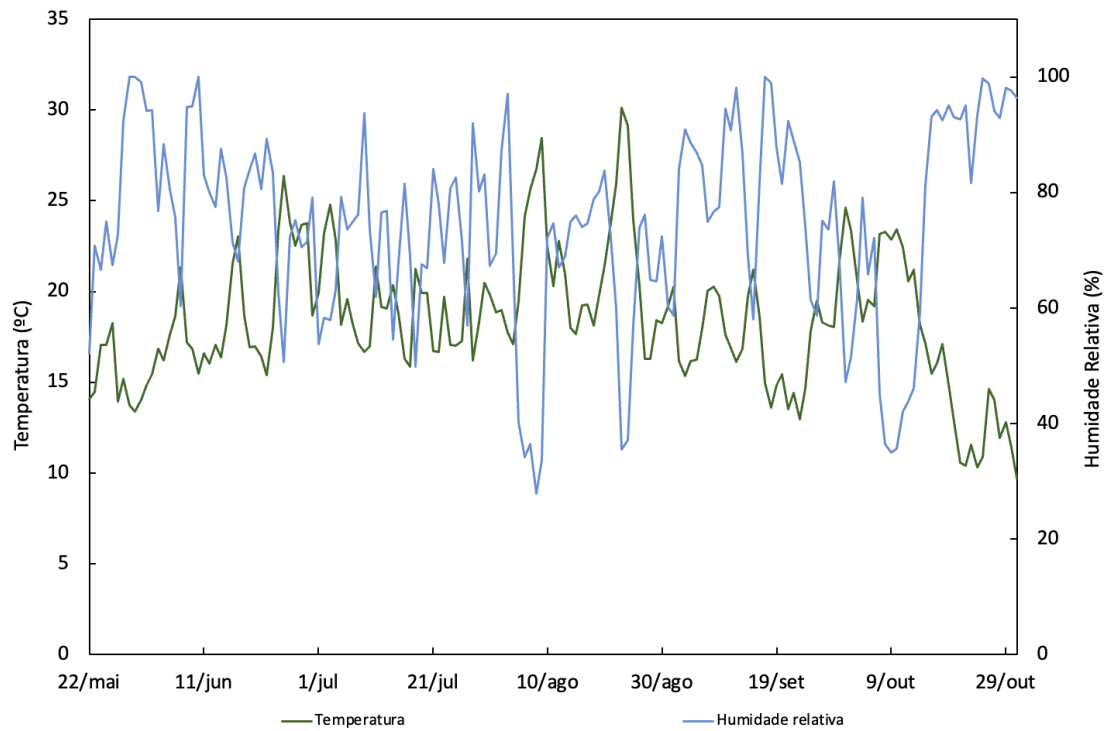


Gráfico 1: Temperatura e humidade relativa média diária no período entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023.

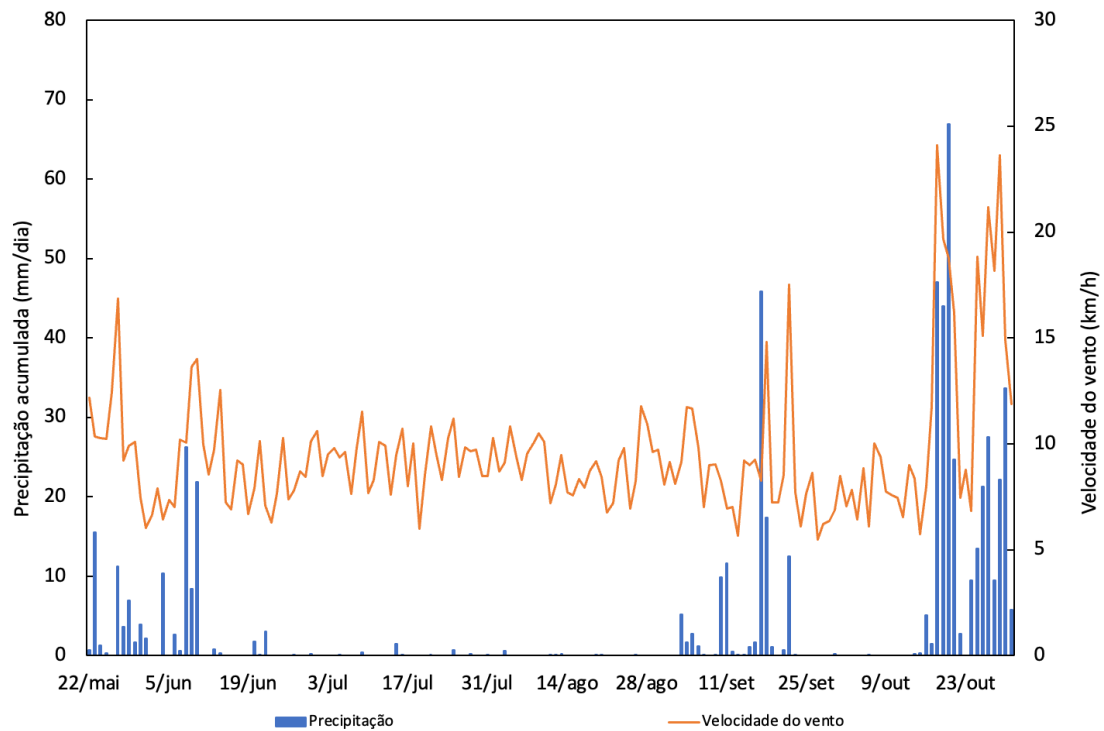


Gráfico 2: Velocidade do vento média diária e precipitação acumulada diária no período entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023.

No período em estudo, entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023, analisando os valores médios diários dos parâmetros meteorológicos, no que respeita à temperatura do ar foi registado um mínimo de 9,7°C e um máximo de 30,1°C. Em termos de humidade relativa do ar, o mínimo da média diária foi 27,9% e o máximo foi 100%, valor este verificado em 4 dias do período em estudo. Relativamente à velocidade do vento, o mínimo da média diária foi de 5,5 km/h e o máximo foi 24,1 km/h. Em relação à precipitação, o valor acumulado diário mínimo foi 0,0 mm e o máximo foi 66,9 mm (ver Tabela 5).

Em termos horários, entre 21 de maio e 31 de outubro de 2023, o mínimo da temperatura média horária do ar foi de 8,0°C, registada às 07h do dia 16 de julho de 2023, e o máximo de 38,6°C, registada às 16h do dia 22 de agosto de 2023. O máximo da humidade relativa do ar média horária foi de 100% e o mínimo de 14% registada às 17h do dia 7 de agosto de 2023. Em termos de velocidade do vento, o mínimo da velocidade do vento média horária foi de 0,0 km/h e o máximo de 41,0 km/h, registada às 15h do dia 24 de outubro de 2023 (ver Tabela 5).

Tabela 5: Parâmetros meteorológicos medidos no período no período entre 22 de maio e 31 de outubro.

		Temperatura (°C)	Humidade Relativa (%)	Velocidade do Vento (km/h)	Precipitação (mm)
Valores médios diários	Máximo	30,1	100,0	24,1	66,9
	Mínimo	9,7	27,9	5,5	0,0
	Média	18,4	74,5	9,5	3,5
Valores médios horários	Máximo	38,6	100	41,0	20,8
	Mínimo	8,0	14	0	0,0
	Média	18,4	74,6	9,6	0,1

3.4.2 Caracterização dos índices de perigo de incêndio no período em estudo

Os índices de perigo de incêndio diários do sistema canadiano FWI foram calculados com base nos parâmetros meteorológicos temperatura do ar, humidade relativa do ar e intensidade do vento medidos às 12h00 UTC e precipitação acumulada nas 24 horas anteriores às 12h00 UTC, medidos na estação do IPMA localizada no aeródromo de Viseu.

Foram também calculados os índices de perigo de incêndio horários do sistema canadiano FWI através das medições horárias e da precipitação acumulada nas últimas 24h. Salienta-se que os índices de perigo de incêndio horários calculados às 12h UTC são iguais aos índices de perigo de incêndio diários. A análise horária do FWI permite acompanhar de forma mais detalhada a variação diária do risco de incêndio, permitindo também a

comparação do índice de perigo de incêndio com as medições em contínuo do TH dos combustíveis florestais.

No Gráfico 3 está representado o índice do TH de combustíveis florestais finos mortos, o FFMC. Pela análise do gráfico verifica-se que o FFMC apresentou valores diários bastante variáveis, mas com valores elevados no período entre 11 de junho e 2 de setembro e entre 23 de setembro e 15 de outubro de 2023, atingindo valores que classificaram o perigo de incêndio como muito elevado e extremo (ver Tabela 2).

Salienta-se que, em alguns períodos onde os valores diários (às 12h UTC) são elevados, verificam-se valores horários reduzidos noutras alturas do dia, devido principalmente ao aumento da humidade relativa e diminuição da temperatura verificada nos períodos noturnos. Salienta-se ainda que existem valores horários mais elevados do índice FFMC do que o valor diário, indicando assim que o período mais gravoso do dia poderá não ser às 12h UTC.

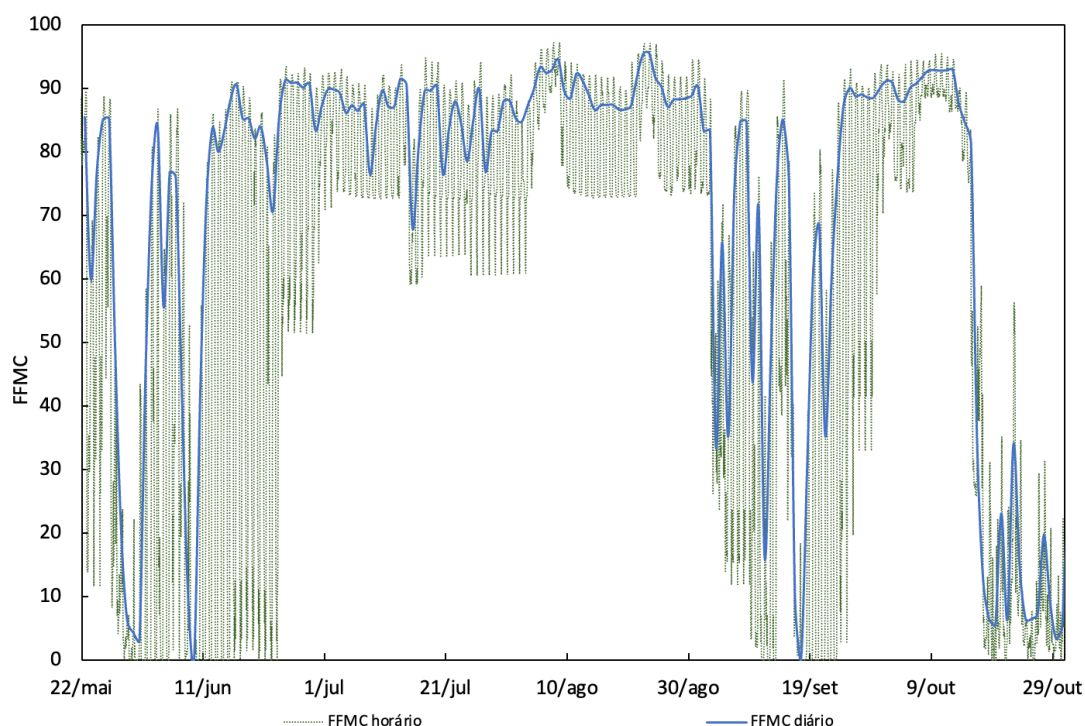


Gráfico 3: Índice FFMC diário e horário medidos no período entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023.

No Gráfico 4 estão representados os índices do TH de combustíveis florestais de resposta lenta, o DMC e DC. Pela análise gráfica verifica-se que para estes índices cumulativos de resposta lenta, relativamente aos valores diários, foram registados os picos mais significativos a 2 de setembro, correspondendo ao perigo de incêndio muito elevado (ver

Tabela 2). Para o DC verifica-se que o máximo do índice diário não corresponde ao máximo do índice horário, sendo este verificado alguns dias depois, a 8 de setembro.

Também nestes gráficos se verifica que o pior cenário do dia poderá não ser às 12h UTC e que, mesmo em dias com índices diários elevados, poderão verificar-se índices horários reduzidos.

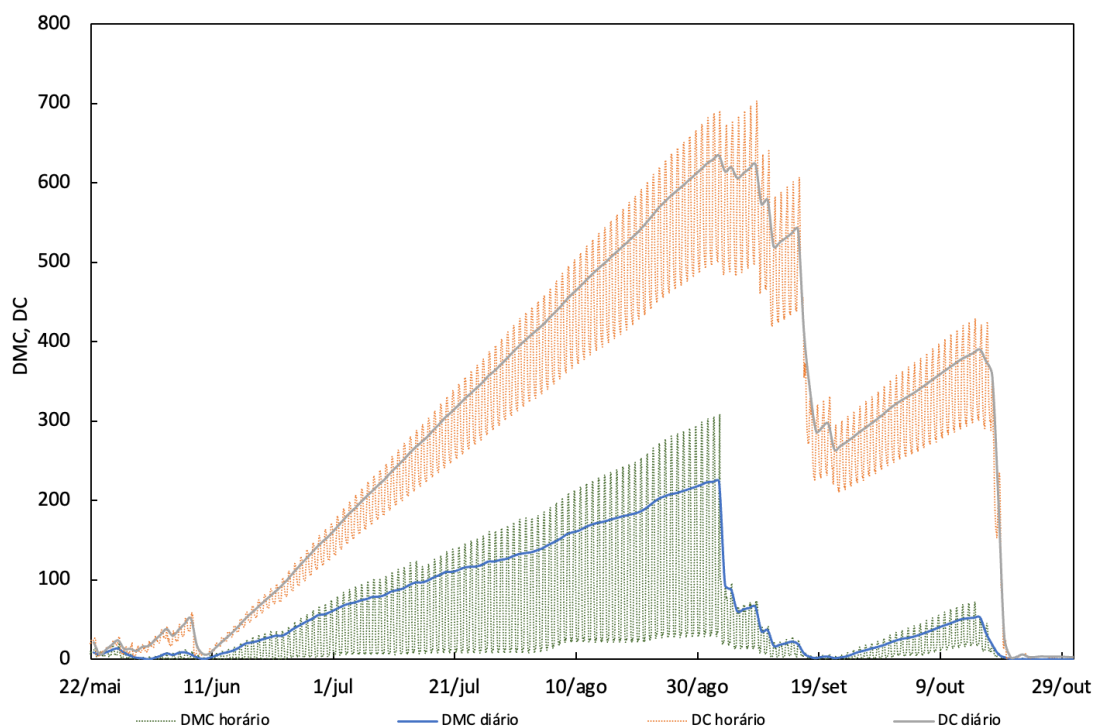


Gráfico 4: Índices DMC e DC horários e diários medidos no período entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023.

No Gráfico 5 é possível analisar os índices relacionados com o comportamento do fogo, ISI (índice de propagação inicial) e BUI (índice de combustível disponível).

O índice ISI revelou-se bastante variável, tendo atingido os valores diários mais elevados no mês de agosto e no mês de outubro, com picos de perigo de incêndio muito elevado (ver Tabela 2) a 7 de agosto, 23 de agosto e 12 de outubro de 2023. Mais uma vez, a utilização de índices horários pode identificar outros períodos com índices mais elevados do que os índices diários.

Quanto ao índice BUI, o seu comportamento em termos diários foi idêntico ao do índice DMC, com dois picos mais relevantes a 2 de setembro e a 15 de outubro, apresentando um perigo de incêndio elevado (ver Tabela 2) entre 14 de julho e 8 de setembro de 2023.

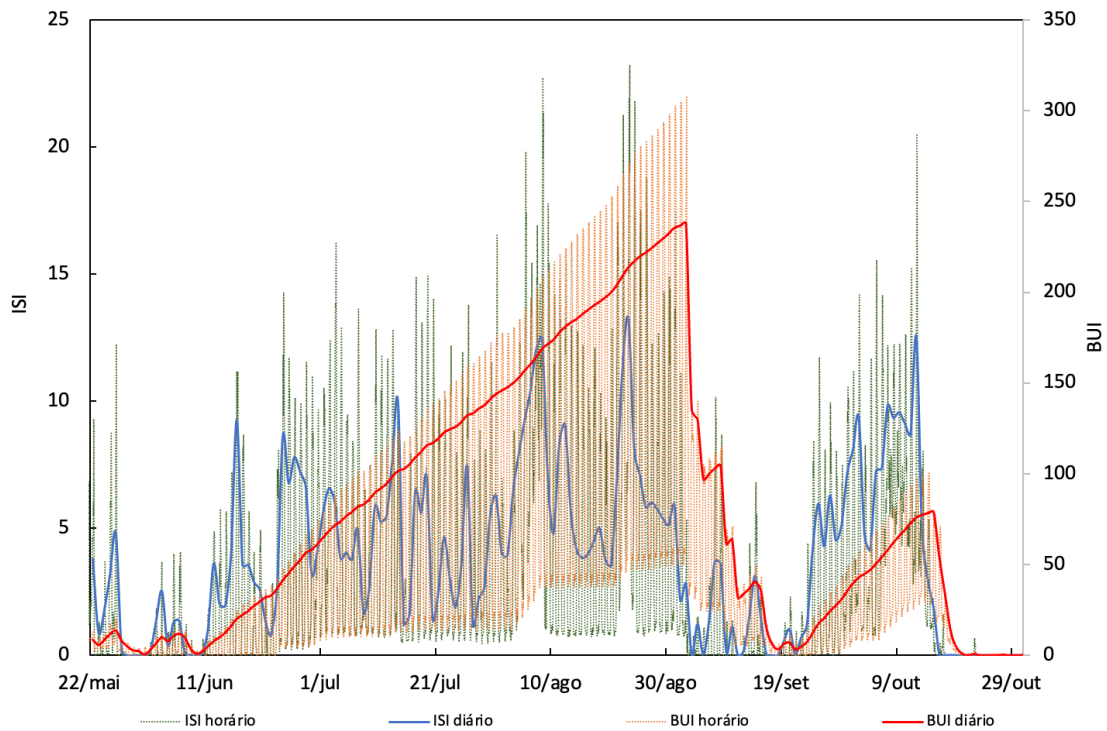


Gráfico 5; Índices ISI e BUI horários e diários medidos no período entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023.

O índice de perigo de incêndio, que representa a intensidade do fogo, o FWI, é apresentado no Gráfico 6. Tendo em consideração as variáveis necessárias para o seu cálculo, este índice apresentou resultados muito oscilantes, entre perigo de incêndio baixo e máximo. No entanto, foi obtido um valor significativo de resultados acima de 25 que indicam perigo muito elevado de incêndio florestal (ver Tabela 2), principalmente nos meses do verão julho e agosto.

Mais uma vez, tendo em conta os valores horários do índice FWI, verifica-se que o pior cenário do dia poderá não ser às 12h UTC e que, mesmo em dias com índice FWI diário elevados, poderá verificar-se um índice horário reduzido noutras alturas do dia.

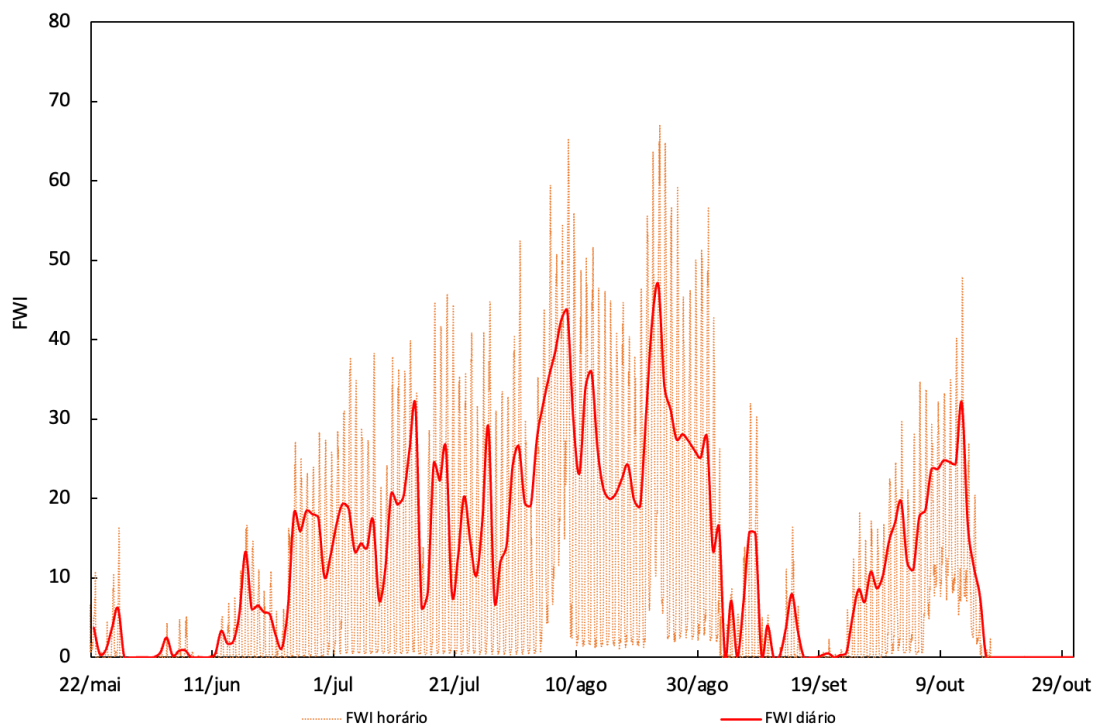


Gráfico 6: Índice FWI horário e diário medidos no período entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023.

De uma forma geral todos os índices atrás analisados apresentaram valores correspondentes a perigo de incêndio elevado, principalmente, tendo em conta os meses mais quentes e habitualmente mais secos de julho e agosto (ver Tabela 6).

Os valores máximos horários são mais elevados do que os valores máximos diários, mostrando assim que o pior cenário do dia poderá não ser às 12h UTC. Este facto é bastante evidente no índice FWI, onde o máximo diário foi de 46,9 e o máximo horário foi de 66,9.

Tabela 6: Valores máximos e médios dos índices de perigo de incêndio diários medidos no período entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023.

		FFMC	DMC	DC	ISI	BUI	FWI
Índices de perigo de incêndio diários	Máximo	95,5	224,5	634,2	13,2	238,2	46,9
		23/08/2023 12:00	02/09/2023 12:00	02/09/2023 12:00	23/08/2023 12:00	02/09/2023 12:00	23/08/2023 12:00
	Média	71,1	68,6	284,3	3,8	77,7	12,7
Índices de perigo de incêndio horários	Máximo	97,2	306,7	702,6	23,2	306,2	66,9
		08/08/2023 17:00	02/09/2023 15:00	08/09/2023 17:00	23/08/2023 17:00	02/09/2023 15:00	23/08/2023 18:00
	Média	59,4	40,8	263,0	3,0	49,5	8,6

■ Baixo/reduzido
 ■ Moderado
 ■ Elevado
 ■ Muito elevado
 ■ Máximo
 ■ Extremo
 ■ Excepcional

3.4.3 Caracterização da ocorrência de incêndios no período em estudo

Segundo os dados disponibilizados pelo ICNF, nomeadamente entre 21 de maio e 18 de setembro de 2023, no que respeita ao número de incêndios, foi registado um total de 4 133 ocorrências em Portugal. Deste total de incêndios, resultou uma área ardida de 24 606,29 ha, da qual 16 347,68 ha correspondem a área florestal de povoamentos, 6 470,69 ha em matos e 1787,94 ha ardidos em área agrícola (ICNF, 2023).

Numa análise mais pormenorizada, verifica-se que ocorreram 3704 incêndios iguais ou inferiores a 1 ha, 325 incêndios com uma área ardida entre 1 ha e 10 ha, 82 incêndios com uma área ardida entre 10 ha e 100 ha e 22 incêndios com uma área ardida superior a 100 ha.

No Gráfico 7 estão representados o número de ocorrências de incêndios e a área ardida para o período estudado. Pela análise gráfica verifica-se que o número de ocorrências e a maior área ardida ocorreram durante o mês de agosto, com os incêndios que se iniciaram em São Teotónio (Odemira) no dia 5 de agosto, Sarzedas (Castelo Branco) no dia 4 de agosto de 2023, Valverde (Mogadouro) no dia 24 de agosto de 2023 e Nelas no dia 23 de agosto de 2023 a apresentarem a maior área ardida deste período.

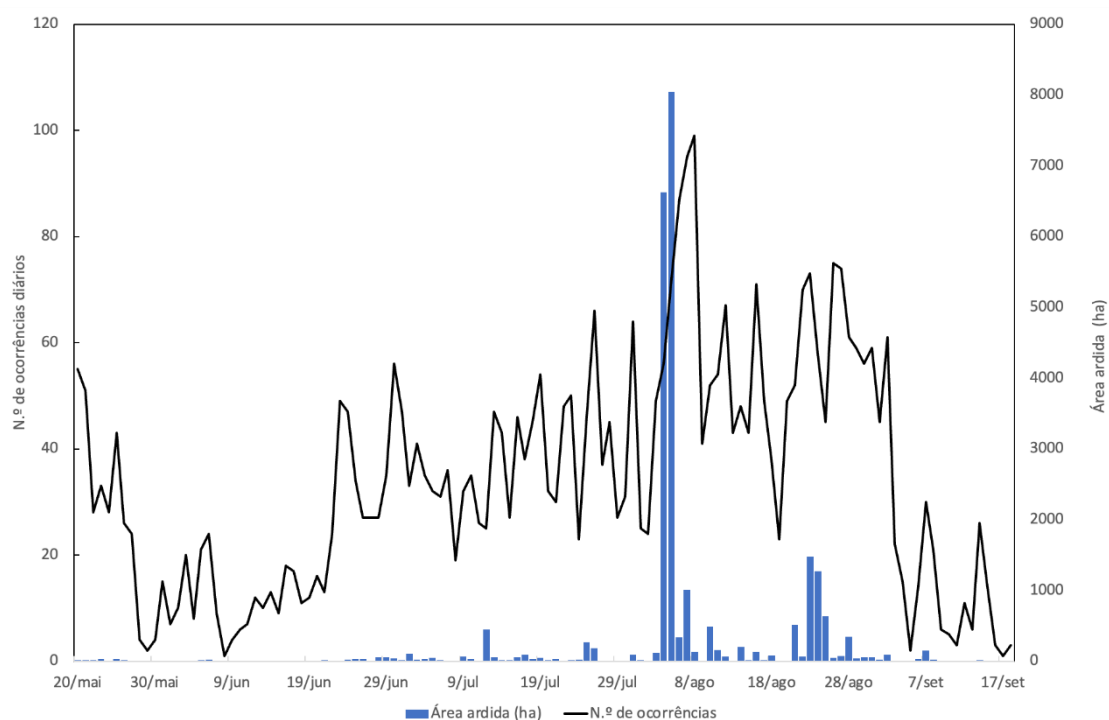


Gráfico 7: Número de ocorrências de incêndios e áreas ardidas entre 21 de maio e 18 de setembro de 2023 em Portugal.

3.4.4 Monitorização do teor de humidade de um *fuel stick*

Na análise do Gráfico 8 sobre a medição do TH pelo *fuel stick* verifica-se uma grande variedade de resultados, desde um valor mínimo de cerca de 2%, registado a 8 de agosto, a cerca de 82%, registado a 31 de outubro. Com expectável, o TH foi mais baixo no período do tempo seco, correspondente aos meses mais quentes, desde cerca de ameadado de junho até ao final do mês de agosto. Quando analisados os períodos em que o TH foi mais elevado, verifica-se que correspondem aos períodos de maior pluviosidade.

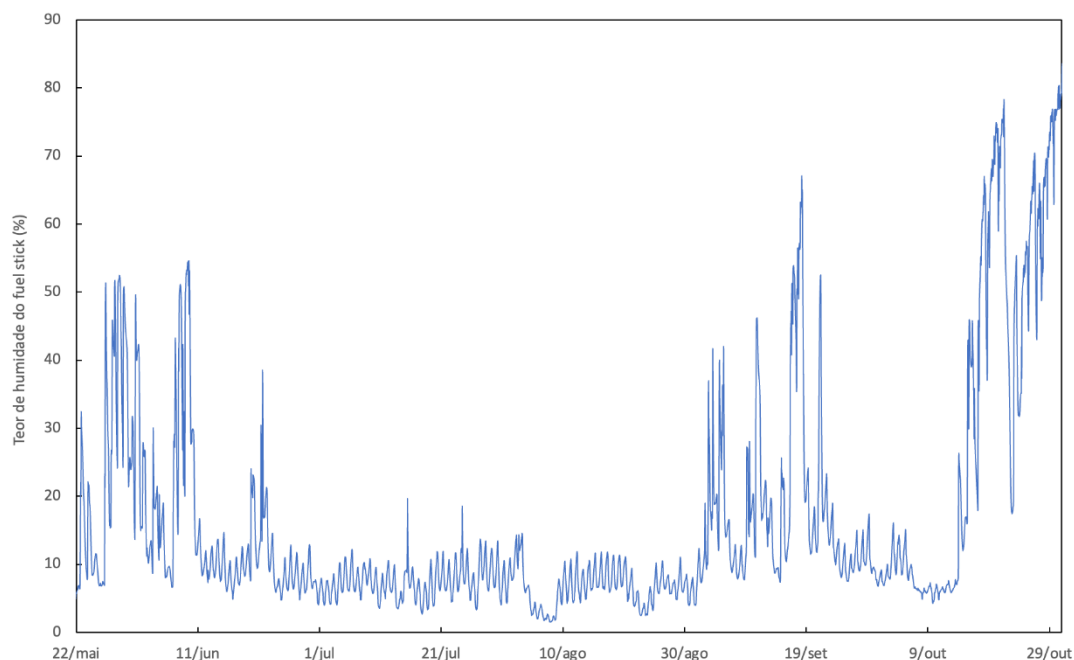


Gráfico 8: TH do *fuel stick* medido no período entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023.

Durante o período de medições do TH do *fuel stick* foi determinado o TH de ramos mortos de pinheiro-bravo de diferentes dimensões (diâmetros de 7 cm, 13,5 cm e 17,5 cm), os quais foram comparadas com os valores do TH do *fuel stick* (ver Gráfico 9 e Tabela 7).

Podemos verificar que apesar de todos os combustíveis apresentarem um comportamento semelhante entre si e em relação ao *fuel stick*, de acordo com a Tabela 7, o combustível que melhor se aproxima da medição do TH do *fuel stick* é o ramo com 13,5 cm de diâmetro com um menor erro percentual.

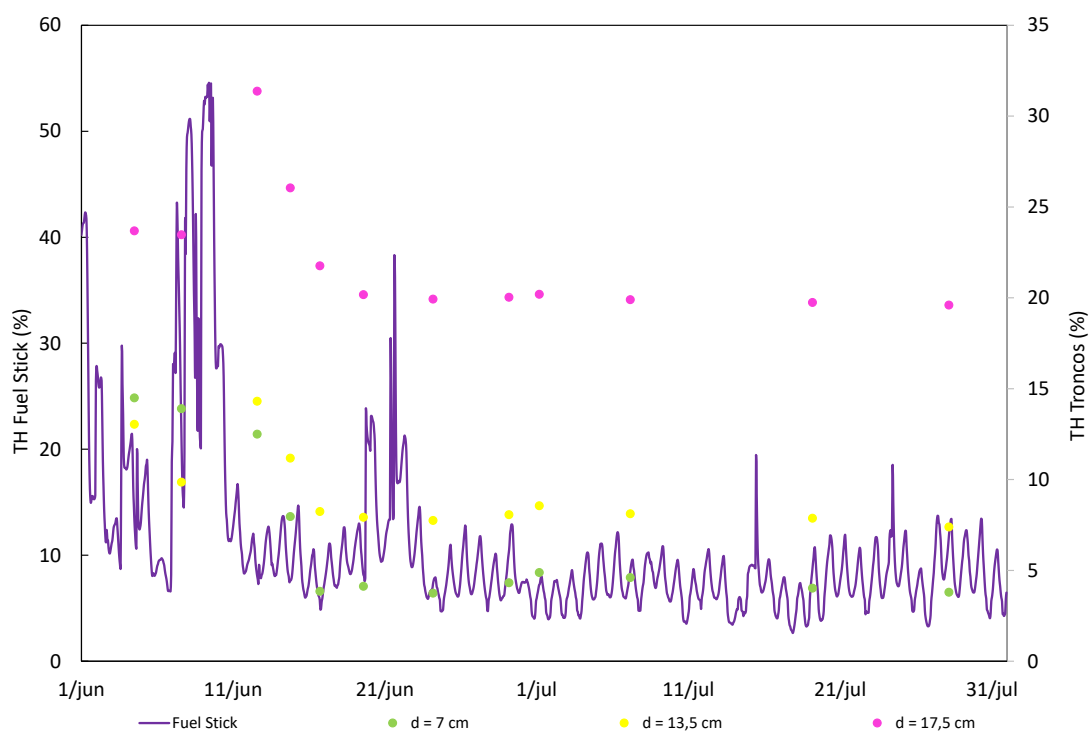


Gráfico 9: Medições do TH do *fuel stick* e do TH de combustíveis médios.

Tabela 7: Comparação entre os valores medidos pelo fuel stick e os valores de TH de ramos mortos de pinheiro-bravo de diferentes dimensões.

Data	TH Fuel Stick (%)	Ramo F = 7 cm		Ramo F = 13,5 cm		Ramo F = 17,5 cm	
		Erro absoluto	Erro percentual	Erro absoluto	Erro percentual	Erro absoluto	Erro percentual
04/06/23 12:00	13,1	1,40	10%	0,06	0,4%	10,58	44,7%
07/06/23 14:00	22,3	8,36	60%	12,40	125,8%	1,21	5,1%
12/06/23 14:00	8,1	4,45	36%	6,26	43,7%	23,32	74,3%
14/06/23 18:00	7,6	0,37	5%	3,58	32,0%	18,45	70,8%
16/06/23 17:00	5,8	1,92	50%	2,47	30,0%	15,99	73,5%
19/06/23 14:00	8,2	4,04	98%	0,24	3,0%	12,02	59,6%
24/06/23 14:00	6,0	2,23	60%	1,78	23,0%	13,96	70,0%
29/06/23 12:00	10,0	5,68	131%	1,93	23,9%	10,04	50,1%
01/07/23 14:00	5,7	0,82	17%	2,85	33,3%	14,49	71,7%
07/07/23 14:00	6,4	1,80	39%	1,71	21,0%	13,49	67,8%
19/07/23 14:00	4,9	0,91	23%	2,94	37,4%	14,82	75,0%
28/07/23 14:00	7,0	3,23	85%	0,35	4,8%	12,57	64,1%
Erro médio absoluto/percentual		2,93	51%	3,05	32%	13,41	61%

3.4.5 Monitorização do TH em campo através de uma balança com células de carga

A determinação do TH em combustíveis finos através de uma balança com duas células de carga permitiu uma monitorização em contínuo da variação da massa ao longo do tempo.

Tal como referido anteriormente, devido à ocorrência de diferentes dificuldades operacionais relacionadas com a comunicação de dados entre o sistema de aquisição e a plataforma de disponibilização de dados, com a influência da temperatura do ar nos resultados obtidos pelas células de carga e devido às sucessivas avarias dos componentes que constituíam o sistema, apenas foram obtidos dados fiáveis por períodos relativamente curtos, e que não foram utilizados na análise de correlações apresentada mais à frente.

Os resultados das medições de TH de combustíveis finos através de uma balança com duas células de carga foram obtidos num período que antecedeu o presente trabalho. E são apresentados no Gráfico 10.

Durante a determinação do TH dos combustíveis finos, foram pontualmente efetuadas medições em laboratório do TH do combustível que estava no cesto da balança com o objetivo de validar as pesagens obtidas pela célula de carga. Estas pesagens são também apresentadas no Gráfico 10 e a sua avaliação é feita na Tabela 8.

Pela análise do gráfico verifica-se que as medições quer do equipamento quer das pesagens controlos foram consistentes e bastante semelhantes, mesmo nos períodos em que os teores de humidade aumentaram, atingindo valores de cerca de 140%. Esta metodologia de comparação possibilita a validação dos dados adquiridos pelo equipamento.

Como podemos verificar pela Tabela 8, durante o período avaliado as medições realizadas pela balança com as células de carga possuem valores muito próximos aos valores medidos em laboratório, com um erro médio do TH de 4,8% e um erro percentual médio de 28,9%.

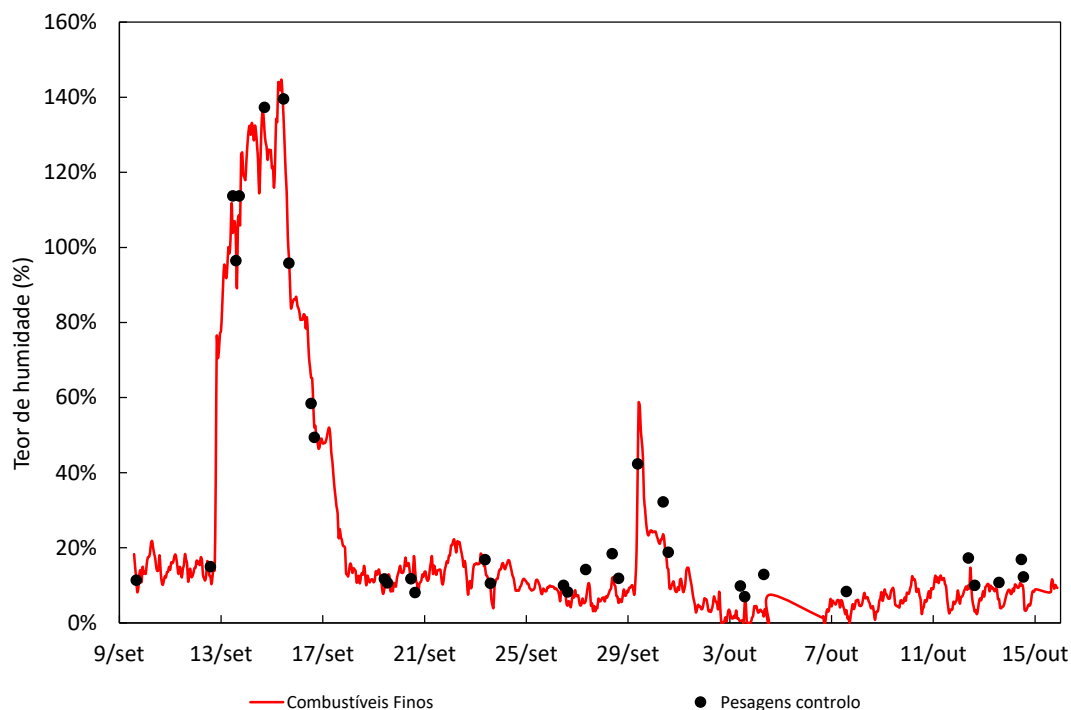


Gráfico 10: Medições do TH de combustíveis finos através de uma balança com células de carga e medições de validação.

Tabela 8: Comparação entre os valores medidos através de uma balança com células de carga e medições do TH em laboratório

Data/Hora	Medições em laboratório do TH	TH medido pelo sensor de carga	Erro absoluto	Erro percentual
09/09/22 16:00	11,4%	11,8%	0,43%	3,7%
12/09/22 14:00	15,0%	12,4%	2,56%	17,1%
13/09/22 11:00	113,7%	104,0%	9,71%	8,5%
13/09/22 14:00	96,5%	102,2%	5,73%	5,9%
13/09/22 17:00	113,7%	108,6%	5,12%	4,5%
14/09/22 17:00	137,3%	131,1%	6,18%	4,5%
15/09/22 11:00	139,6%	134,5%	5,07%	3,6%
15/09/22 16:00	95,8%	97,7%	1,90%	2,0%
16/09/22 13:00	58,4%	65,3%	6,89%	11,8%
16/09/22 16:00	49,4%	52,1%	2,71%	5,5%
19/09/22 10:00	11,7%	8,9%	2,81%	24,0%
19/09/22 13:00	10,7%	10,0%	0,67%	6,3%
20/09/22 11:00	11,7%	11,6%	0,12%	1,0%
20/09/22 15:00	8,1%	14,4%	6,33%	78,3%
23/09/22 09:00	16,9%	15,0%	1,85%	11,0%
23/09/22 14:00	10,5%	10,2%	0,33%	3,1%
26/09/22 11:00	10,0%	8,4%	1,60%	16,0%
26/09/22 15:00	8,3%	4,6%	3,66%	44,3%
27/09/22 08:00	14,2%	5,8%	8,41%	59,2%
28/09/22 09:00	18,4%	11,9%	6,53%	35,4%
28/09/22 15:00	11,9%	5,3%	6,55%	55,3%

Data/Hora	Medições em laboratório do TH	TH medido pelo sensor de carga	Erro absoluto	Erro percentual
29/09/22 09:00	42,4%	38,7%	3,66%	8,6%
30/09/22 09:00	32,2%	23,6%	8,62%	26,8%
30/09/22 14:00	18,8%	14,2%	4,60%	24,5%
03/10/22 10:00	9,8%	0,5%	9,34%	94,9%
03/10/22 14:00	7,0%	5,1%	1,86%	26,7%
04/10/22 08:00	12,9%	1,7%	11,17%	86,8%
07/10/22 14:00	8,3%	3,4%	4,93%	59,2%
12/10/22 09:00	17,3%	10,0%	7,26%	42,1%
12/10/22 15:00	10,0%	3,0%	7,00%	70,0%
13/10/22 14:00	10,8%	6,3%	4,47%	41,5%
14/10/22 11:00	16,9%	9,9%	6,97%	41,3%
14/10/22 13:00	12,2%	8,7%	3,53%	28,9%
Erro médio absoluto/percentual			4,8%	28,9%

3.4.6 Monitorização do TH do solo

Tendo em conta que o TH do solo, principalmente nas camadas superficiais, é influenciado também pelos mesmos fatores que influenciam os combustíveis florestais, principalmente os de resposta mais lenta, foram também realizados ensaios de monitorização do TH do solo.

Tal como referido anteriormente, devido à existência de outros projetos de investigação para os quais os sensores de TH do solo estavam também em utilização, apenas foram obtidos dados por um período relativamente curto e que não foram utilizados na análise de correlações apresentada mais à frente.

No Gráfico 11 é apresentado o TH do solo medido pelos sensores posicionados a 10 cm e a 20 cm de profundidade num período que antecedeu o presente trabalho. Analisando a variação do TH medido pelos sensores de humidade do solo, de uma forma geral, verifica-se um comportamento idêntico entre o sensor a 10 cm e o sensor a 20 cm, com uma tendência de secagem do solo durante o período de medição. Tal como expectável, o TH do sensor posicionado a 10 cm de profundidade é mais variável devido ao facto de se encontrar mais à superfície, caracterizando a camada do solo que mais é influenciada pelas condições meteorológicas.

Considerando-se que existe uma boa relação entre as medições do TH do solo e o índice DC, este método ajuda na prevenção do risco de incêndio, indicando o estado de secura das dos combustíveis grosso mortos em camadas mais profundas.

Em alguns estudos, têm sido encontradas boas relações entre as medições do TH do solo e o DC, indicando que esta metodologia pode ser adequada para avaliar a secura das camadas mais profundas da manta morta assim como dos combustíveis de maior diâmetro.

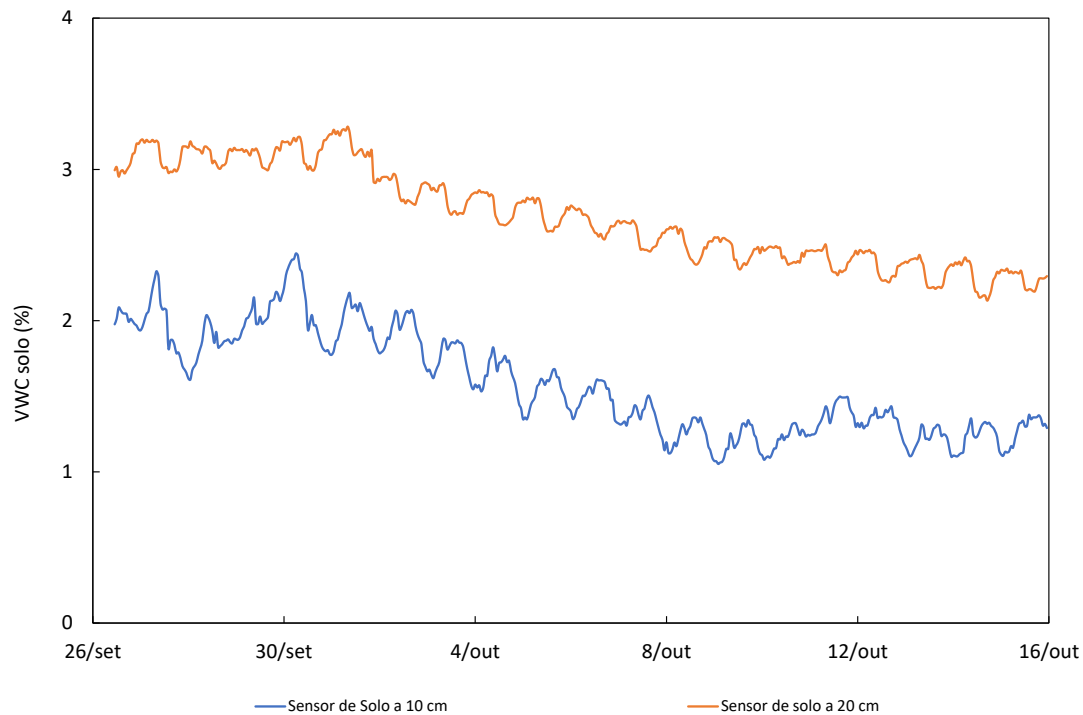


Gráfico 11: TH do solo medido pelos sensores a 10cm e a 20 cm de profundidade.

Para os sensores de TH do solo, foi realizado um ensaio de validação de resultados com uma amostra de solo num processo de secagem dentro de uma câmara climática, com temperatura e humidade relativa do ar constantes, sendo simultaneamente monitorizado o peso da amostra e determinado a evolução do VWC da amostra pelos diferentes métodos (ver Gráfico 12 e Gráfico 13).

Como pode ser observado no Gráfico 12 e Gráfico 13, os valores obtidos pelos sensores de TH do solo estão muito próximos dos valores obtidos pelo método de pesagem da amostra. Esta comparação de resultados valida os resultados obtidos pelos sensores de solo, garantindo a sua fiabilidade.

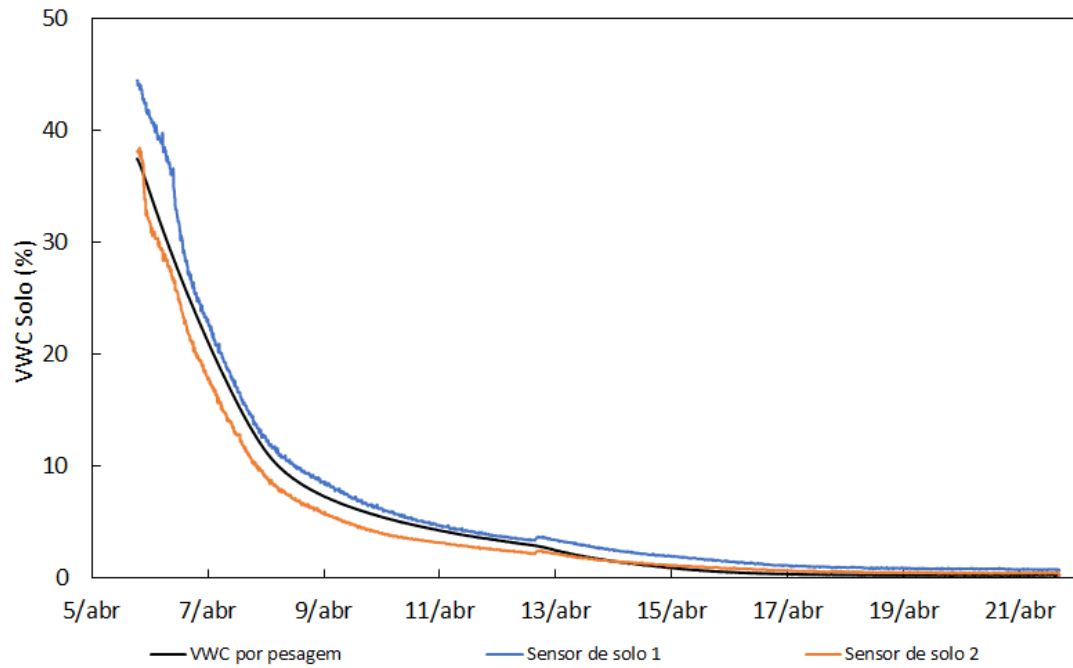


Gráfico 12: Ensaio de validação de dados dos sensores de humidade do solo.

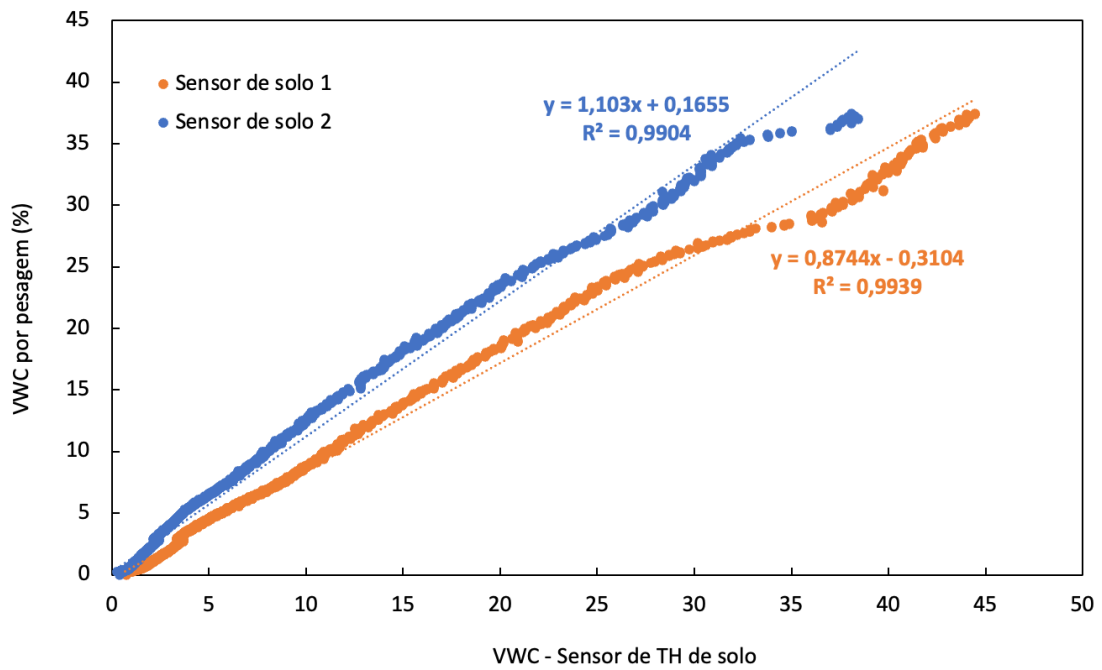


Gráfico 13: Ensaio de validação de dados dos sensores de humidade do solo.

3.4.7 Modelação do TH dos combustíveis florestais

Tal como referido anteriormente, a utilização de parâmetros meteorológicos e de outros parâmetros que alimentam modelos matemáticos é uma ferramenta adequada para monitorização e previsão do TH de diferentes tipos de combustíveis florestais mortos.

Assim, no presente estudo foi realizada a modelação do TH dos combustíveis florestais mortos tendo por base os modelos desenvolvidos em S. Lopes et al. (2014) e (S. Lopes et al.(2022). Em S. Lopes et al. (2014) e (S. Lopes et al., 2022) foram desenvolvidos, respetivamente, modelos de previsão do TH de combustíveis florestais finos (1h) e combustíveis florestais regulares (10h), ambos através da descrição dos fenómenos de sorção (dessorção e adsorção) de humidade por parte dos combustíveis, tendo em conta os teores de humidade de equilíbrio dos combustíveis para diferentes condições ambientais e os tempos de resposta dos combustíveis ambos determinados experimentalmente.

Os parâmetros meteorológicos utilizados na modelação do TH foram as medições horárias da temperatura e humidade relativa ao ar, registados na estação meteorológica do IPMA do Aeródromo de Viseu. Esta modelação não considera o efeito da precipitação, apenas os fenómenos de sorção.

No Gráfico 14 são apresentados os resultados da modelação do TH dos combustíveis florestais finos (Aglhas de pinheiro-bravo morto), combustíveis florestais regulares (ramos de pinheiro-bravo morto, 0.6 cm a 2.5 cm de diâmetro) e combustíveis florestais médios (ramos de pinheiro-bravo morto, 3 cm a 5 cm de diâmetro). Nesta modelação foi utilizado o teor de humidade de equilíbrio e os tempos de resposta ambos determinados experimentalmente para diferentes condições ambientais e para os combustíveis referidos.

No Gráfico 15 são apresentados os resultados da modelação do TH dos combustíveis florestais finos (combustíveis de 1h), combustíveis florestais regulares (combustíveis de 10h) e combustíveis florestais médios (combustíveis de 100h). Nesta modelação foi utilizado o teor de humidade de equilíbrio determinado experimentalmente para diferentes condições ambientais para os combustíveis Aglhas de pinheiro-bravo morto, ramos de pinheiro-bravo morto, 0.6 cm a 2.5 cm de diâmetro e ramos de pinheiro-bravo morto, 3 cm a 5 cm de diâmetro, sendo que para os tempos de resposta utilizados foram de 1h, 10h e 100h.

Tal como referido anteriormente, e como pode ser verificado no Gráfico 14 e no Gráfico 15, esta modelação não considera o efeito da precipitação, apenas os fenómenos de sorção, sendo que os valores modelados mostram, tal como aconteceu nos valores dos índices de perigo de incêndio (FWI) e medições do *fuel stick*, valores modelados mínimos do TH a 7 e 8 de agosto, 22 e 23 de agosto e entre 6 e 13 de outubro de 2023.

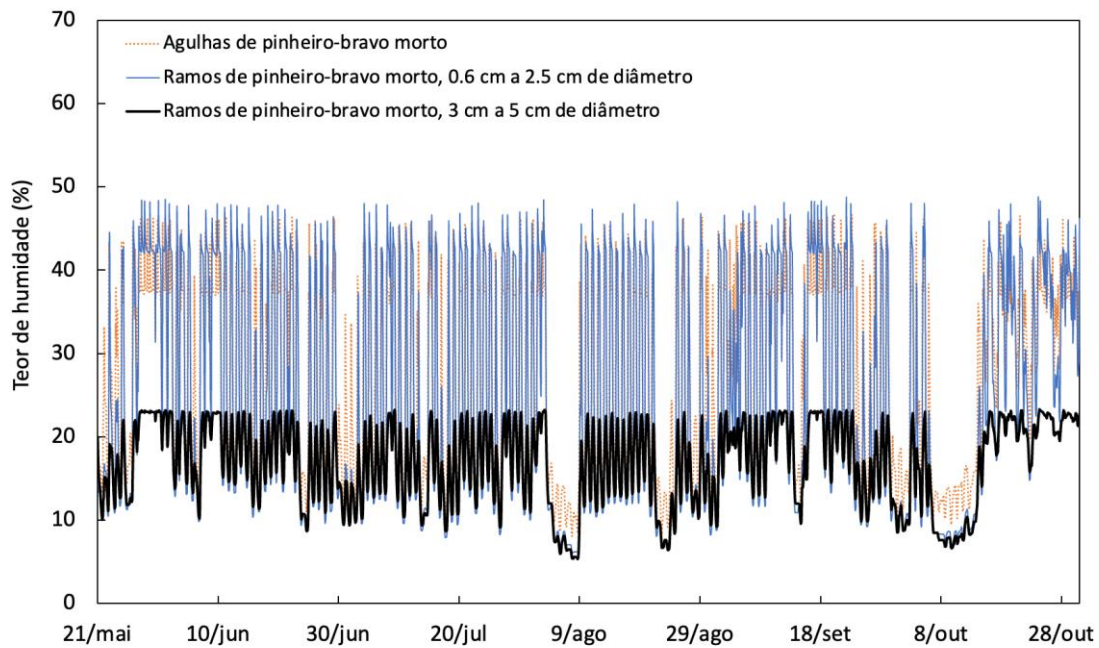


Gráfico 14: Modelação do TH dos combustíveis florestais finos, regulares e médios

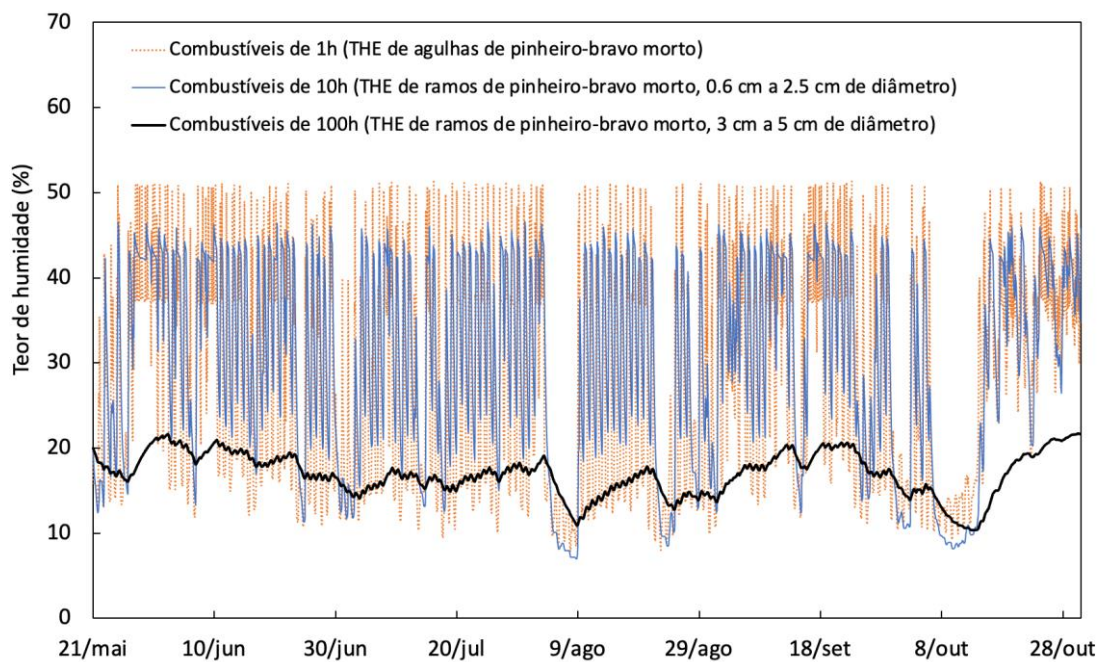


Gráfico 15: Modelação do TH dos combustíveis florestais de 1h, 10h e 100h

3.4.8 Relações entre os dados do *fuel stick* e o risco de incêndio

Para melhor se compreender a relação dos resultados obtidos com as variáveis e parâmetros estudados, foi aplicado o teste estatístico de correlação de Pearson e foram analisadas as relações entre os parâmetros monitorizados.

Assim, relativamente ao *fuel stick*, na Tabela 10 e Tabela 11 são apresentados os coeficientes de correlação de Pearson entre os índices de perigo de incêndio horários e diários, respetivamente, do sistema canadiano e o TH do *fuel stick* para diferentes períodos de medição do TH. Os intervalos de correlação de Pearson usados na análise dos dados são as apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9: Coeficientes de correlação de Pearson e interpretação usada na análise de dados.

Coeficiente de correlação de Pearson (ρ)	Interpretação da correlação
1	Perfeita
$0,9 \leq 1$	Muito forte
$0,6 \leq 0,9$	Forte
$0,3 \leq 0,6$	Moderada
$0,1 \leq 0,3$	Fraca
$0 \leq 0,1$	Nula

Podemos verificar que os TH do *fuel stick* apresentam uma forte correlação com os índices FFMC, ISI e FWI, especialmente para o período mais seco do período total em análise, isto é, nos meses de julho e agosto, quer se trate de valores horários do TH do *fuel stick* e dos índices do sistema canadiano, quer se trate de valores diários registados às 12 UTC. Assim, o *fuel stick*, apesar de se tratar de um combustível de 10h, no que respeita aos índices do sistema canadiano relaciona-se melhor com o índice de secura dos combustíveis finos (FFMC) e índice de propagação inicial (ISI).

Tabela 10: Coeficientes de correlação de Pearson entre os índices de perigo de incêndio horários do sistema canadiano e o TH do *fuel stick* para diferentes períodos de medição do TH

	TH Fuel Stick (%) todo o período	TH Fuel Stick (%) julho e agosto	TH Fuel Stick (%) agosto
FFMC horário	-0,74	-0,70	-0,79
DMC horário	-0,35	-0,39	-0,37
DC horário	-0,43	-0,23	-0,29
ISI horário	-0,44	-0,65	-0,67
BUI horário	-0,38	-0,38	-0,37
FWI horário	-0,40	-0,61	-0,62

Tabela 11: Coeficientes de correlação de Pearson entre os índices de perigo de incêndio diários do sistema canadiano e o TH do fuel stick para diferentes períodos de medição do TH

	TH Fuel Stick (%) todo o período	TH Fuel Stick (%) julho e agosto	TH Fuel Stick (%) agosto
FFMC diário	-0,88	-0,88	-0,89
DMC diário	-0,46	-0,25	-0,04
DC diário	-0,42	-0,23	-0,02
ISI diário	-0,60	-0,81	-0,87
BUI diário	-0,48	-0,24	-0,03
FWI diário	-0,56	-0,77	-0,86

Relativamente ao FWI, no Gráfico 16 é apresentada a relação entre o índice FWI do sistema canadiano e o TH do *fuel stick* com os dados do mês de agosto. A equação de regressão presente no Gráfico 16 permite determinar o FWI com base no TH do *fuel stick*, podendo ser utilizada também para definir algumas classes de risco de incêndio.

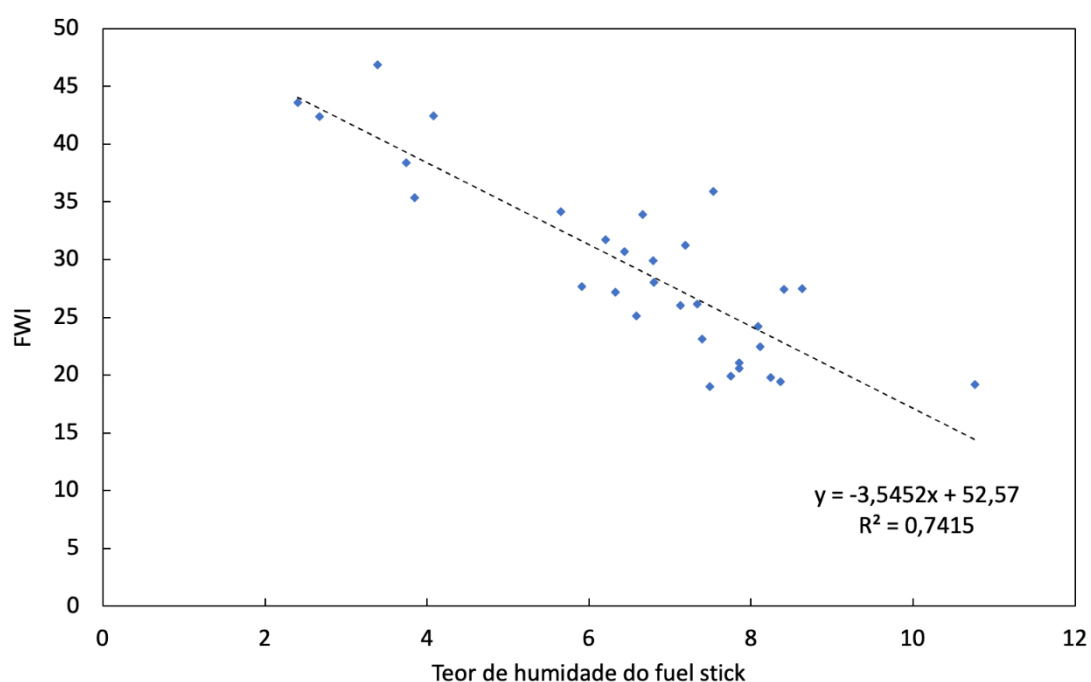


Gráfico 16: Relação entre o índice FWI do sistema canadiano e o TH do fuel stick com os dados do mês de agosto

De acordo com os dados obtidos em agosto de 2023, e utilizando a equação de regressão do Gráfico 16, o valor máximo do FWI é de 52,57 para a situação de TH do *fuel stick* de 0%. Desta forma, poderá ser feita a classificação do risco de incêndios de acordo com o índice FWI do sistema canadiano e o TH do *fuel stick* com os dados do mês de agosto, tal como apresentado na Tabela 12.

Tabela 12: Classificação do risco de incêndios de acordo com o índice FWI do sistema canadiano e o TH do *fuel stick* com os dados do mês de agosto

Classe de perigo	FWI	TH do fuel stick
Baixo ou reduzido	0 - 8,2	> 12,5
Moderado	8,2 - 17,2	12,5 - 10,0
Elevado	17,2- 24,6	10,0 - 7,9
Muito elevado	24,6- 38,3	7,9 - 4,0
Máximo	38,3- 50,1	4,0-0,7
Extremo	50,1 - 64	< 0,7
Excepcional	> 64	-

Na Tabela 13 são apresentados os coeficientes de correlação de Pearson entre a ocorrência de incêndios diária e o TH do *fuel stick* registado às 12 UTC, para diferentes períodos de medição do TH.

Na Tabela 13 podemos verificar que os TH do *fuel stick* apresentam uma correlação forte com o número de ocorrências diárias, nomeadamente, com todas as ocorrências do mês de agosto. Na análise entre o TH do *fuel stick* e todas as ocorrências no período em análise e no mês de julho e agosto, verificam-se correlações moderadas. Quando analisada a correlação com o número de ocorrências com áreas ardidas > 1ha, considera-se existir uma relação fraca a moderada com os TH do *fuel stick*. Podemos também verificar que o TH do *fuel stick* não se relaciona significativamente com a área ardida diariamente.

Tabela 13: Coeficientes de correlação de Pearson entre a ocorrência de incêndios e o TH do *fuel stick* para diferentes períodos de medição do TH

	TH Fuel Stick (%) todo o período	TH Fuel Stick (%) julho e agosto	TH Fuel Stick (%) agosto
Área ardida (ha) – Todas as ocorrências	-0,14	-0,28	-0,34
N.º de ocorrências – Todas as ocorrências	-0,61	-0,64	-0,78
Área ardida (ha) – Ocorrências > 1ha	-0,15	-0,35	-0,45
N.º de ocorrências – Ocorrências > 1ha	-0,40	-0,53	-0,58

Relativamente às ocorrências diárias, no Gráfico 17 é apresentada a relação entre a ocorrência de incêndios diária e o TH do *fuel stick* registado às 12 UTC com os dados do mês de agosto. A equação de regressão presente no Gráfico 17 permite estimar o número de ocorrências diárias com base no TH do *fuel stick* registado às 12 UTC.

Assim, pela equação de regressão presente no Gráfico 17 podemos verificar que o valor máximo de ocorrências de incêndios diária é de cerca de 108 para a situação de 0% de TH do *fuel stick* às 12 UTC. Por outro lado, não correrão incêndios florestais quando o TH do *fuel stick* atingir 14,1%.

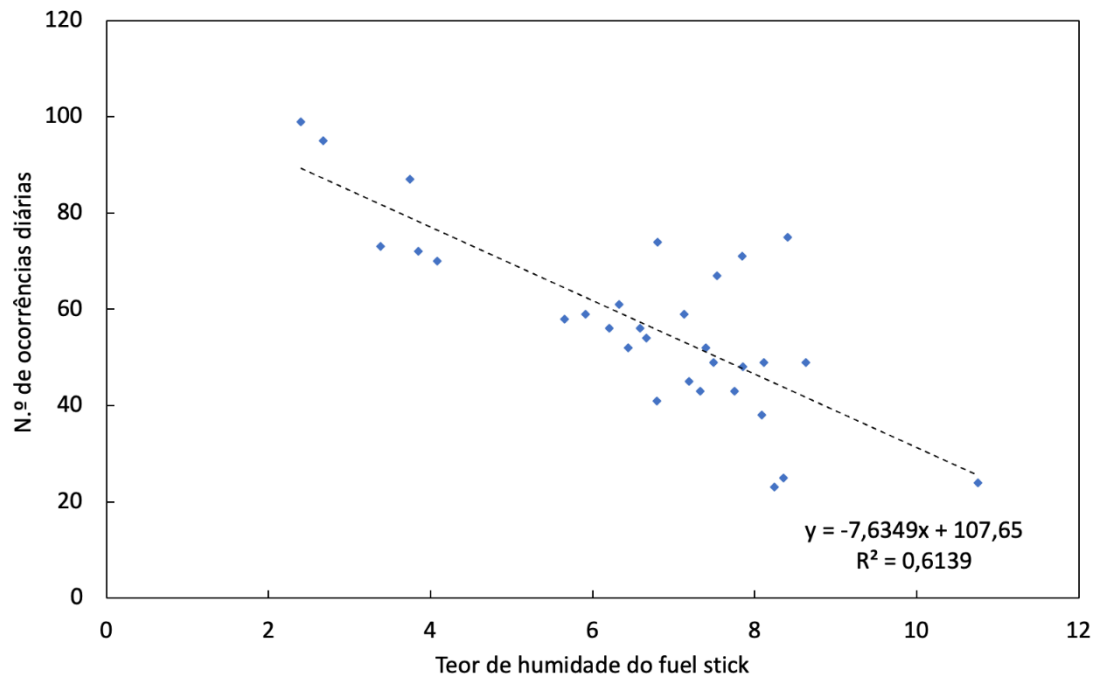


Gráfico 17: Relação entre a ocorrência de incêndios e o TH do fuel stick

Na Tabela 14 são apresentados os coeficientes de correlação de Pearson entre o TH modelado e o TH horário do *fuel stick* para diferentes períodos de medição do TH. Podemos verificar que o modelo que melhor reflete o TH horário do *fuel stick* é o modelo que foi desenvolvido por Lopes S. et al. (2023), onde foram determinados os parâmetros de modelação (teor de humidade de equilíbrio e tempo de resposta) para ramos de pinheiro-bravo morto, de 3 cm a 5 cm de diâmetro, classificados como combustíveis de 100h. Salienta-se ainda que as correlações para os períodos secos são significativas para os combustíveis de 1h e 10h, contrariamente ao que acontece com os combustíveis de 100h, para os quais as correlações são mais fracas.

Tabela 14: Coeficientes de correlação de Pearson entre o TH modelado e o TH do *fuel stick* para diferentes períodos de medição do TH

	TH Fuel Stick (%) todo o período	TH Fuel Stick (%) julho e agosto	TH Fuel Stick (%) agosto
TH das Agulhas de pinheiro-bravo morto	0,51	0,81	0,84
TH dos Ramos de pinheiro-bravo morto, 0.6 cm a 2.5 cm de diâmetro	0,50	0,86	0,88
TH dos Ramos de pinheiro-bravo morto, 3 cm a 5 cm de diâmetro	0,57	0,93	0,95
TH dos Combustíveis de 1h (THE de agulhas de pinheiro-bravo morto)	0,48	0,76	0,80
TH dos Combustíveis de 10h (THE de ramos de pinheiro-bravo morto, 0.6 cm a 2.5 cm de diâmetro)	0,47	0,88	0,90
TH dos Combustíveis de 100h (THE de ramos de pinheiro-bravo morto, 3 cm a 5 cm de diâmetro)	0,51	0,50	0,53

No Gráfico 18 é apresentada a evolução do TH modelado com dados de ramos de pinheiro-bravo morto e o TH do *fuel stick* para o período entre julho e agosto. Como podemos verificar, os valores do TH do *fuel stick* é sempre mais reduzido do que o TH modelado com dados de ramos de pinheiro-bravo morto, sendo que este facto resultará da metodologia laboratorial de determinação dos parâmetros necessários à modelação (teor de humidade de equilíbrio e tempo de resposta), em que são realizados os testes de sorção dentro uma câmara climática na ausência de radiação solar, sendo que em campo a radiação solar, para as mesmas condições de temperatura e humidade relativa do ar, poderá resultar em valores mais reduzidos do TH dos combustíveis florestais

Ainda assim, no Gráfico 19 apresenta-se a relação que permite calcular o TH do *fuel stick* com o TH obtido por modelação, sendo assim possível, utilizando valores resultantes de previsão meteorológica, prever o TH do *fuel stick* e conseqüentemente o risco de incêndio florestal.

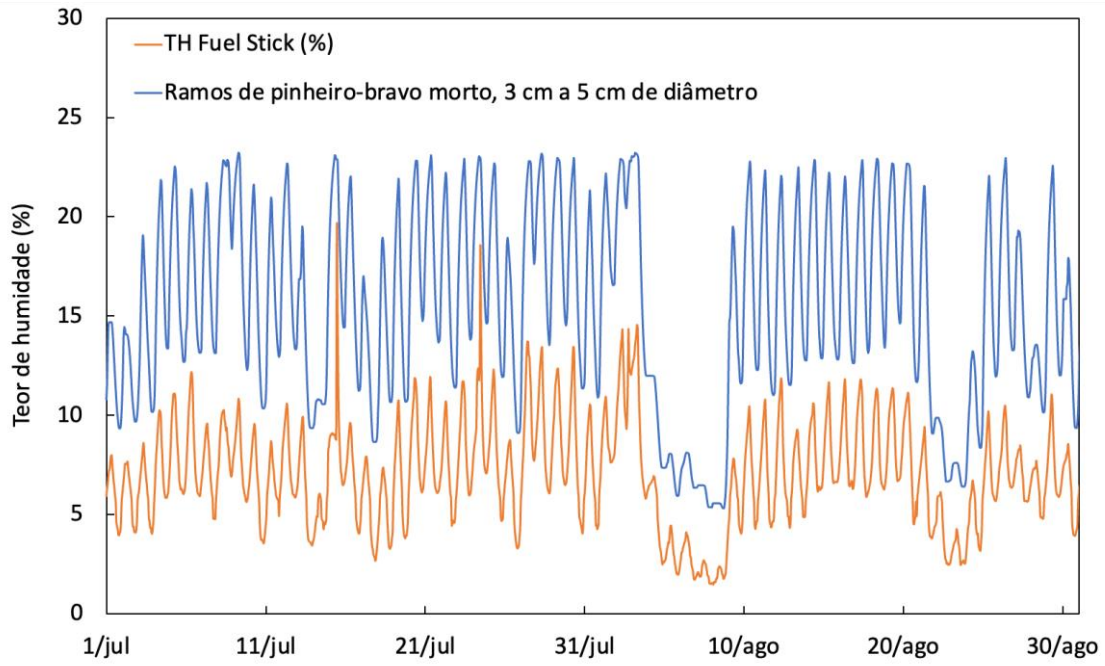


Gráfico 18: Evolução do TH modelado com dados de ramos de pinheiro-bravo morto e o TH do fuel stick para o período entre julho e agosto

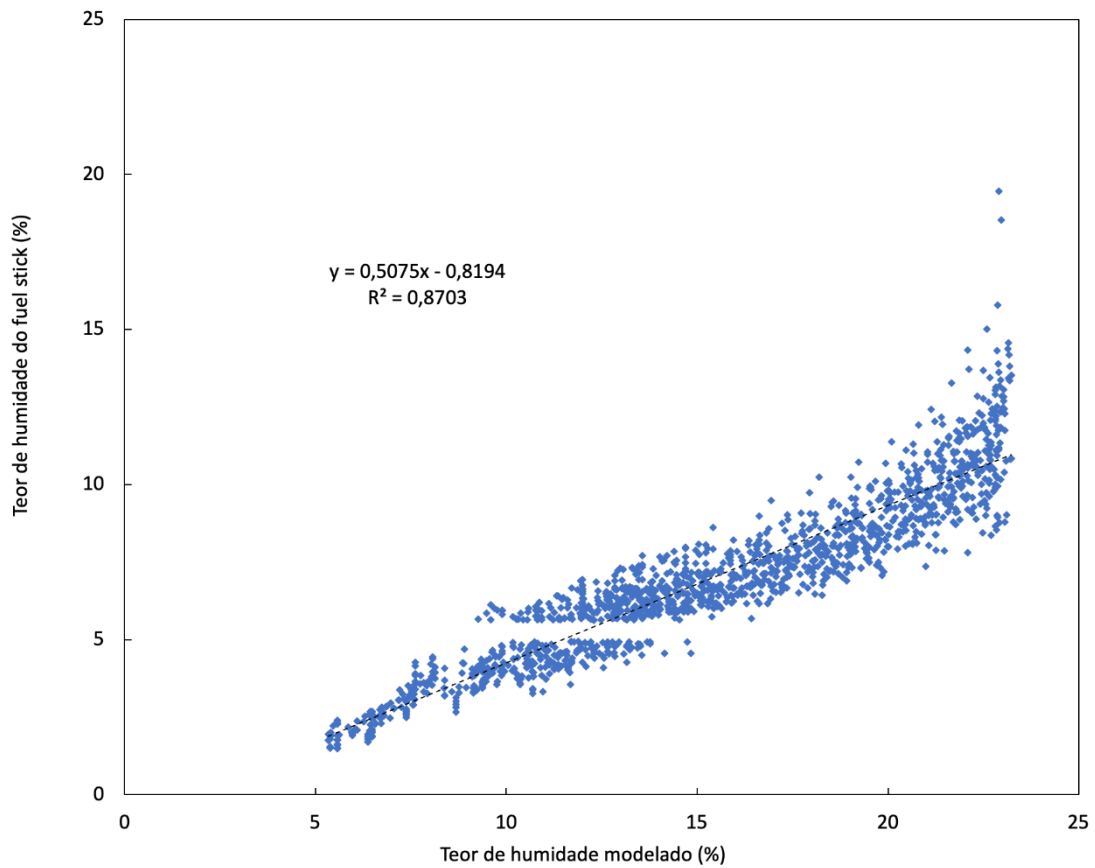


Gráfico 19: Relação entre o TH obtido por modelação e o TH do *fuel stick*.

4 CONCLUSÃO

É do conhecimento geral que as alterações climáticas sentidas em todo o mundo, nomeadamente as ondas de calor e os períodos de seca prolongada, têm levado a um aumento significativo do risco de incêndio.

Dados do 6º Inventário Florestal Nacional (IFN6) referente a 2015 (ICNF, 2019), indicam que cerca de 69% do território nacional continental era coberto por espaço florestal, contemplando matos, floresta e terrenos improdutivos. À data deste inventário na região centro dominava a floresta de pinhal e outras resinosas, com 486,7 mil ha, dos quais 460,0 mil ha eram representados por pinheiro-bravo e 7,7 mil ha por pinheiro manso, sendo os eucaliptais o segundo tipo de formações florestais mais presentes na região, com 439,7 mil ha.

Considerando a potenciação do risco de incêndio causado pelo aquecimento global e consequentes alterações climáticas, os trabalhos da presente tese incidiram sobre o estudo e monitorização do TH em combustíveis florestais, na medida em que estes estão intimamente relacionados com o risco de incêndio, particularmente com o potencial do fogo e o seu tempo de ignição, com a sua intensidade, velocidade de propagação, consequências e dificuldade de combate. Nesse sentido, o objetivo central do trabalho foi o desenvolvimento de métodos de medição de parâmetros ambientais e florestais que permitam monitorizar em contínuo o risco de incêndio de uma determinada região de forma expedita e fiável, com representatividade temporal e espacial e a um custo mais reduzido do que os métodos atuais. Para tal foi utilizado um *fuel stick*, sensores de humidade do solo e células de carga para uma monitorização em contínuo do TH dos combustíveis florestais. Posteriormente, os dados resultantes de TH do *fuel stick* foram comparados com indicadores do perigo de incêndio e com os valores das ocorrências e área ardida dos incêndios florestais.

Na caracterização meteorológica do período em estudo, entre 22 de maio e 31 de outubro de 2023, analisando os valores médios diários dos parâmetros meteorológicos, no que respeita à temperatura do ar foi registado um mínimo de 9,7°C e um máximo de 30,1°C, em termos de humidade relativa do ar, o mínimo da média diária foi 27,9% e o máximo foi 100%, e relativamente à velocidade do vento, o mínimo da média diária foi de 5,5 km/h e o máximo foi 24,1 km/h. Em relação à precipitação, o valor acumulado diário mínimo foi 0,0 mm e o máximo foi 66,9 mm.

Na caracterização dos índices de perigo de incêndio do sistema canadiano FWI foram feitos dois tipos de análises, tendo sido calculados os índices com base horária e com base diária. O FFMC apresentou valores diários bastante variáveis, atingindo valores que classificaram o perigo de incêndio como muito elevado e extremo, salientando-se que existem

valores horários mais elevados comparativamente aos diários, indicando assim que o período mais gravoso do dia poderá não ser às 12h UTC. Para os índices cumulativos de resposta lenta DMC e DC, foram registados valores diários correspondentes ao perigo de incêndio muito elevado, verificando-se que no DC o máximo do índice diário não corresponde ao máximo do índice horário, que o pior cenário do dia poderá não ser às 12h UTC e que, mesmo em dias com índices diários elevados, poderão verificar-se índices horários reduzidos. Quanto ao índice ISI os resultados foram bastante variáveis, tendo atingido valores diários correspondentes a picos de perigo de incêndio muito elevado, notando-se que, mais uma vez, a utilização de índices horários pode identificar outros períodos com índices mais elevados do que os índices diários. Quanto ao índice BUI, o seu comportamento em termos diários foi idêntico ao do índice DMC, apresentando um perigo de incêndio elevado. Relativamente ao FWI, este índice apresentou resultados muito oscilantes, entre risco de perigo de incêndio baixo e máximo, no entanto, foi obtido um valor significativo de resultados que indicam perigo muito elevado de incendio florestal, principalmente nos meses do verão julho e agosto. Também para o FWI, verifica-se que o pior cenário do dia poderá não ser às 12h UTC e que, mesmo em dias com índice FWI diário elevados, poderá verificar-se um índice horário reduzido noutras alturas do dia.

Da análise da ocorrência de incêndios no período em estudo, concluiu-se que a grande maioria dos incêndios foram de pequenas dimensões, iguais ou inferiores a 1 ha (3704 ocorrências) e que apenas ocorreram 22 incêndios de grande dimensão, com uma área ardida superior a 100 ha. Verificou-se também que o maior número de ocorrências e a maior área ardida ocorreram durante o mês de agosto.

No que respeita aos resultados do TH adquiridos com o *fuel stick*, obtiveram-se valores desde os 2% aos 82%, tendo sido, como se esperava, registado o TH mais baixo no período do tempo seco, correspondente aos meses mais quentes, e o mais elevado nos períodos de maior pluviosidade. Das medições de TH em ramos mortos de pinheiro-bravo de diferentes dimensões que foram sendo feitas a par com as medições do *fuel stick*, concluiu-se que o combustível que melhor se aproxima da medição do TH do *fuel stick* foi o ramo com 13,5 cm de diâmetro.

A determinação do TH dos combustíveis finos através de uma balança foi acompanhada por medições pontualmente efetuadas em laboratório que permitiram validar os dados resultantes do equipamento. Da análise dos resultados obtidos a partir das duas metodologias, concluiu-se que as medições realizadas pela balança com as células de carga possuem valores muito próximos aos valores medidos em laboratório.

Na análise da humidade do solo obtida com os sensores de solo verificou-se, de uma forma geral, um comportamento idêntico entre o sensor a 10 cm e o sensor a 20 cm de profundidade, com uma tendência de secagem do solo durante o período de medição, com resultados mais variáveis no sensor a 10 cm devido ao facto de se encontrar mais à superfície, caracterizando a camada do solo que mais é influenciada pelas condições meteorológicas. Para esta metodologia foi realizado um ensaio de validação de resultados que permitiu concluir que os valores obtidos pelos sensores de TH do solo foram muito próximos dos valores obtidos pelo método de pesagem da amostra, o que valida os resultados emitidos pelo equipamento.

Com a modelação do TH dos combustíveis florestais mortos finos e regulares através de fenómenos de sorção verificou-se que os resultados modelados vão de encontro aos obtidos quer na análise dos índices de perigo de incêndio (FWI) quer com as medições do *fuel stick*, com valores modelados mínimos nos meses de agosto e de outubro.

Quando avaliadas as relações entre os dados do *fuel stick* e o risco de incêndio, através do teste estatístico de Pearson, concluiu-se que os TH do *fuel stick* apresentam uma forte correlação com os índices FFMC, ISI e FWI, especialmente para o período mais seco do período total em análise, isto é, nos meses de julho e agosto, quer se trate de valores horários do TH do *fuel stick* e dos índices do sistema canadiano, quer se trate de valores diários registados às 12 UTC. Verifica-se, assim, que o *fuel stick*, apesar de se tratar de um combustível de 10h, no que respeita aos índices do sistema canadiano relaciona-se melhor com o índice de secura dos combustíveis finos (FFMC) e com o índice de propagação inicial (ISI). Foi também concluído que através da análise de regressão entre o FWI e o TH do *fuel stick* com os dados do mês de agosto, é possível definir algumas classes de risco de incêndio.

Quando se trata da relação entre os TH do *fuel stick* e o número de ocorrências de incêndios diária, verifica-se existir uma correlação forte com o número de ocorrências diárias, nomeadamente, com todas as ocorrências do mês de agosto. Na análise entre o TH do *fuel stick* e todas as ocorrências no período em análise e no mês de julho e agosto, verificam-se correlações moderadas, assim como acontece com a correlação com o número de ocorrências com áreas ardidas > 1ha.. Relativamente às ocorrências diárias, a equação de regressão permite concluir que o valor máximo de ocorrências de incêndios diária é de cerca de 108 para a situação de 0% de TH do *fuel stick* às 12 UTC e que não correrão incêndios florestais quando o TH do *fuel stick* atingir 14,1%.

Os coeficientes de correlação de Pearson entre o TH modelado e o TH horário do *fuel stick* para diferentes períodos de medição do TH, indicam que o modelo que melhor reflete o TH horário do *fuel stick* é o modelo onde foram determinados os parâmetros de modelação

(teor de humidade de equilíbrio e tempo de resposta) para ramos de pinheiro-bravo morto, classificados como combustíveis de 100h, salientando-se que as correlações para os períodos secos são também significativas para os combustíveis de 1h e 10h, contrariamente ao que acontece com os combustíveis de 100h, para os quais as correlações são mais fracas. Relativamente à análise da evolução do TH modelado com dados de ramos de pinheiro-bravo morto e o TH do *fuel stick* para o período entre julho e agosto, pôde-se verificar que os valores do TH do *fuel stick* foram sempre mais reduzidos do que o TH modelado, o que será justificável pelo facto da metodologia laboratorial de determinação dos parâmetros necessários à modelação ser realizada dentro uma câmara climática na ausência de radiação solar, sendo que em campo a radiação solar poderá resultar em valores mais reduzidos do TH dos combustíveis florestais.

O FWI é um índice de risco de incêndio com algumas limitações, já que não fornece um valor quantitativo real do teor de humidade das espécies florestais que pretende representar, apresentando também uma resolução temporal diária que poderá ser insuficiente quando ocorrem variações significativas das condições meteorológicas ao longo do dia. Como forma de colmatar essa falha, a aplicação de um sistema multiparamétrico com as metodologias apresentadas no presente trabalho e a aplicação dos modelos matemáticos também aqui expostos, parecem ser apropriados para o complemento, ou mesmo substituição, à utilização do índice canadiano em Portugal, tendo em consideração a possibilidade de se prever o TH de combustíveis e, conseqüentemente, o risco de incêndio florestal com a utilização de valores resultantes de previsão meteorológica.

REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS

- ANEPC. (2023). *ANEPC - Autoridade Nacional de Emergência e Proteção Civil—Riscos Mistos—Incêndios Rurais*. <https://prociv.gov.pt/pt/prevencao-e-preparacao/avaliacao-de-riscos/riscos-mistos/>
- Bento-Gonçalves, A., Vieira, A., & Lourenço, L. (2011). *Field trip guidebook: 3rd international meeting of fire effects on soil properties*. https://www.academia.edu/1264478/Field_trip_guidebook_3rd_international_meeting_of_fire_effects_on_soil_properties
- Blackmarr, W. H. (1972). Moisture Content Influences Ignitability of Slash Pine Litter. *Res. Note SE-173. Asheville, NC: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station. 7 p., 173.* <https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/4635>
- Campbell Scientific. (2023). *Fuel Moisture and Fuel Temperature Sensors—Fire weather sensors*. <http://www.campbellsci.com/fuel-moisture-temperature>
- Cawson, J. G., Nyman, P., Schunk, C., Sheridan, G. J., Duff, T. J., Gibos, K., Bovill, W. D., Conedera, M., Pezzatti, G. B., & Menzel, A. (2020). Corrigendum to: Estimation of surface dead fine fuel moisture using automated fuel moisture sticks across a range of forests worldwide. *International Journal of Wildland Fire, 29*(6), 560–560. https://doi.org/10.1071/wf19061_co
- Dimitrakopoulos, A., & Papaioannou, K. (2001). Flammability Assessment of Mediterranean Forest Fuels. *Fire Technology, 37*, 143–152. <https://doi.org/10.1023/A:1011641601076>

- DNGPFR. (2022). *8.º Relatório Provisório de Incêndios Rurais—2022. Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (8.º RPIR/DGPFR/2022)*. Direção Nacional de Gestão do Programa de Fogos Rurais.
- DNGPFR. (2023). *8.º Relatório Provisório de Incêndios Rurais—2023. Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (8.º RPIR/DGPFR/2023)*. Direção Nacional de Gestão do Programa de Fogos Rurais.
- Hanes, C. C., Wotton, M., Bourgeau-Chavez, L., Woolford, D. G., Bélair, S., Martell, D., & Flannigan, M. D. (2023). Evaluation of new methods for drought estimation in the Canadian Forest Fire Danger Rating System. *International Journal of Wildland Fire*, 32(6), 836–853. <https://doi.org/10.1071/WF22112>
- ICNF. (2019). *Inventário Florestal Nacional (IFN)—Relatório Final 2015* (6; p. 284). Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas.
- ICNF. (2023). *Lista de Incêndios Rurais de 2023 do Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas*. <https://fogos.icnf.pt/localizador/faztable.asp>
- ICNF. (sem data). *Índice Meteorológico de Risco de Incêndio—Índices do FWI. ICNF - Fogos*.
- IPMA. (2020). *Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Nota Metodológica. Cálculo do Índice de Risco de Incêndio Rural Risco Conjuntural e Meteorológico (RCM). Versão1.0*.
- IPMA. (2023a). *Instituto Português do Mar e da Atmosfera. FWI e Probabilidade de Extremos*. <https://www.ipma.pt/pt/riscoincendio/fwi/>
- IPMA. (2023b). *Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Índice Meteorológico de Incêndio (FWI)*. <https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/otempo/risco.incendio/index.jsp?page=pirfwi.xml>

- IPMA. (2023c). *Instituto Português do Mar e da Atmosfera—FWI e RCM*.
<https://www.ipma.pt/pt/enciclopedia/otempo/risco.incendio/index.jsp?page=pirp.xml>
- Lopes, S. M. G. (2014). *Modelos de Previsão do Teor de Humidade de Combustíveis Florestais* [doctoralThesis]. <https://estudogeral.uc.pt/handle/10316/23786>
- Lopes, S., Pinho, P., Santos, S., Rodrigues, N., Raposo, J., & Viegas, D. (2022). *Modelling sorption processes of 10-hour dead Pinus pinaster branches* (pp. 1220–1227).
https://doi.org/10.14195/978-989-26-2298-9_185
- Lopes, S., Viegas, D., & Lemos, L. (2014). Equilibrium moisture content and timelag of dead Pinus pinaster needles. *Equilibrium moisture content and timelag of dead Pinus pinaster needles*, 23, 721–732. <https://doi.org/10.1071/WF13084>
- Matthews, S. (2006). A process-based model of fine fuel moisture. *International Journal of Wildland Fire - INT J WILDLAND FIRE*, 15. <https://doi.org/10.1071/WF05063>
- Nelson, R.M. (2000). Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(7), 1071–1087. <https://doi.org/10.1139/X00-032>
- NRC. (2023). *Canadian Wildland Fire Information System, Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System*. Natural Resources Canada.
<https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi>
- Rothermel, R. C. (1972). A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. *Res. Pap. INT-115*. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Intermountain Forest and Range Experiment Station. 40 p., 115.
<https://www.fs.usda.gov/research/treesearch/32533>

- Viegas, D., Bovio, G., Ferreira, A., Nosenzo, A., & Sol, B. (1999). Comparative Study of Various Methods of Fire Danger Evaluation in Southern Europe. *International Journal of Wildland Fire*, 9, 235–246. <https://doi.org/10.1071/WF00015>
- Viegas, D., Reis, R., Cruz, M., & Viegas, M. (2004). Calibração do Sistema Canadano de Perigo de Incêndio para Aplicação em Portugal. *Silva Lusitana*, 12, 77–93.
- Viegas, D., Viegas, M., & Ferreira, A. (1992). Moisture Content of Fine Forest Fuels and Fire Occurrence in Central Portugal. *International Journal of Wildland Fire*, 2(2), 69. <https://doi.org/10.1071/WF9920069>
- Viegas, D. X., Almeida, M. F., & Ribeiro, L. M. (2019). *Análise dos incêndios florestais ocorridos a 15 de outubro de 2017*. Centro de Estudos sobre Incêndios Florestais (CEIF). Universidade de Coimbra. <https://www.portugal.gov.pt/pt/gc21/comunicacao/documento?i=analise-dos-incendios-florestais-ocorridos-a-15-de-outubro-de-2017>
- Viegas, D. X., Carlos Rossa, & Muís Mário Ribeiro. (2011). *Incêndios Florestais*. Verlag Dashöfer Portugal.
- Wagner, C. E. V. (1987). *Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System*. Minister of Supply and Services Canada.
- WaterScout. (sem data). *Soil Moisture Sensor SM100—Product Manual*. Spectrum Technologies, Inc.
- WaterScout. (2023). *WaterScout SM 100 Soil Moisture Sensor | Spectrum Technologies*. <https://www.specmeters.com/brands/waterscout/sm100/>

