



UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

Rafael do Nascimento Vieira

**ESTUDO DA MONITORIZAÇÃO POR  
AMOSTRAGEM DO TEOR DE HUMIDADE DOS  
COMBUSTÍVEIS FLORESTAIS NA PREVISÃO DO  
RISCO DE INCÊNDIO**

VOLUME 1

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, ramo de Energia e Ambiente, orientada pelos professores Domingos Xavier Viegas e Jorge Rafael Nogueira Raposo, apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Setembro de 2021



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE  
COIMBRA

# **Estudo da monitorização por amostragem do teor de humidade dos combustíveis florestais na previsão do risco de incêndio**

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

## **STUDY OF FIELD MONITORING THE FUEL MOISTURE CONTENT IN FIRE DANGER ASSESSMENT**

**Autor**

**Rafael do Nascimento Vieira**

**Orientadores**

**Domingos Xavier Viegas**

**Jorge Rafael Nogueira Raposo**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro</b> Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
<b>Orientador</b>	<b>Professor Doutor Domingos Xavier Viegas</b> Professor Catedrático da Universidade de Coimbra
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor Carlos Xavier Pais Viegas</b> Professor Auxiliar Convidado da Universidade de Coimbra <b>Professor Doutor Sérgio Lopes</b> Professor Adjunto do Instituto Politécnico de Viseu

**Colaboração Institucional**

---



**Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial**

**Coimbra, Setembro, 2021**



## Agradecimentos

Uma jornada acadêmica não se faz só, e sim com o apoio de diversas pessoas, que me ajudaram a chegar nesta tão esperada conclusão, a dissertação de mestrado. A essas pessoas, teço sinceros agradecimentos:

Ao orientador desta dissertação Professor Doutor Domingos Xavier Viegas, ao coorientador Professor Doutor Jorge Rafael Raposo e aos investigadores Daniela Alves e Luís Reis pela disponibilidade e auxílio durante todo o percurso do projeto e decisivos para o seu sucesso.

Aos projetos MCFire e FireStorm, de referências PCIF/MPG/0108/2017 e PCIF/GFC/0109/2017 respetivamente, pelos dados facultados a esta dissertação.

Aos meus pais e avós, meus alicerces, que desde pequeno apoiam a minha educação, me ensinaram valiosas lições e me tornaram o ser humano que sou hoje.

Um agradecimento especial ao meu avô Edson, falecido neste ano, que me foi grande inspiração durante toda a minha vida e minha maior influência para escolher a Engenharia Mecânica como profissão.

Aos meus irmãos pelo companheirismo de todas as horas.

À minha namorada, pelo carinho e atenção tão especiais a mim despendidos.

Aos amigos e colegas, tanto da UFF quanto da UC, que tornaram essa longa jornada mais agradável.



## Resumo

O objetivo deste trabalho é avaliar o efeito do uso de medições de teor de humidade em combustíveis finos por amostragem no cálculo do Fire Weather Index (FWI), índice canadiano que traduz o risco de incêndio florestal. As recolhas foram feitas nos concelhos da Lousã e de Viseu durante o período de 2018 a 2021.

Os valores obtidos para o teor de humidade dos combustíveis através da razão entre massa húmida e massa seca das amostras foram introduzidos na fase de cálculo do Fine Fuel Moisture Content (FFMC), componente do FWI. Estes resultados foram comparados através de gráficos, retas de regressão linear e coeficientes de correlação ( $R^2$ ) do FFMC e FWI com o que seria obtido da forma tradicional, sem tais medições. Por fim, o novo modelo foi validado com uso da base de dados de incêndios do Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF) nos anos de 2018 a 2020. Foi comprovada a correlação positiva entre o FWI e o número de ocorrências de incêndios, mas a relação com a área ardida nos distritos do estudo foi mais fraca. Ao agregar a informação obtida por amostragens, percebeu-se melhor resposta do FWI com a área ardida.

Paralelamente, foi também analisada a discrepância entre o cálculo do FWI através das equações do sistema canadiano proposto por Van Wagner em 1987 e das tabelas propostas pelo *Canadian Forestry Service* (CFS) em 1984; bem como a influência de diferentes conjuntos de informação meteorológica sobre o resultado quantitativo e qualitativo do FWI, comparando-se os dados oficiais cedidos pela autoridade meteorológica portuguesa IPMA (Instituto Português do Mar e da Atmosfera) e dados oriundos da rede online e *Visual Crossing*. Concluiu-se que as tabelas apresentam resultados muito próximos aos das equações ( $R^2 = 0,97$ ) e que, apesar da alta influência do conjunto de informação meteorológica no valor absoluto de FWI, a fonte não-oficial utilizada nesta dissertação produz resultados satisfatórios quando comparada com a fonte oficial ( $R^2 = 0,81$ ).

**Palavras-chave:** Teor de humidade, amostragem, FWI, FFMC, incêndios florestais, combustíveis.





## Abstract

The objective of this work is to evaluate the effect of using field measurements of fine fuels moisture content (FFMC) in the calculation of the Fire Weather Index (FWI), a Canadian index that reflects the forest fire risk. The sampling was carried out in the municipalities of Lousã and Viseu during the period of 2018 to 2021.

The values of fuel moisture content obtained through the ratio between wet and dry mass of the samples were introduced in the calculation phase of the Fine Fuel Moisture Content (FFMC), a component of the FWI. These results were then compared through FFMC and FWI graphs, linear regression curves and correlation coefficient ( $R^2$ ) against results obtained in the traditional way, without such measurements. Finally, the new model was validated using the fire database of the Institute for the Conservation of Nature and Forests (ICNF) for the years 2018 to 2020. The positive correlation between the FWI and the number of fire occurrences was proven, but the relationship with the burned area in the districts studied was weaker. By aggregating the information obtained from sampling, a better FWI response to the burned area was observed.

At the same time, was also analyzed the discrepancy between the FWI calculation through equations proposed by Van Wagner in 1987 and through tables proposed by the Canadian Forestry Service (CFS) in 1984; as well as the influence that different sets of weather history have on the quantitative and qualitative output of the FWI, comparing official data provided by the portuguese weather authority IPMA (Portuguese Institute for Sea and Atmosphere) and unofficial data provided by online source *Visual Crossing*. It was concluded that the tables output is very close to those of the equations ( $R^2 = 0.97$ ) and that, despite the high influence of the weather information set on the absolute value of FWI, the unofficial source used in this dissertation produces satisfactory results when compared to the official ( $R^2 = 0.81$ ).

**Keywords** Moisture content, sampling, FWI, FFMC, forest fire, fuels.



---

## Índice

Índice de Figuras .....	viii
Índice de Tabelas.....	ix
Siglas .....	x
1. Introdução .....	12
1.1. Motivação.....	12
1.1.1. Projeto MCFIRE .....	12
1.2. Objetivos .....	13
1.3. Estado da arte .....	13
1.3.1. Sistemas de cálculo do risco do incêndio.....	13
1.3.2. Teor de Humidade de Combustíveis Finos .....	20
2. Metodologia Conceitual .....	26
2.1. Modelo de previsão do risco de incêndio.....	26
2.2. Escala espacial.....	26
2.3. Escala temporal .....	27
2.4. Método de cálculo .....	28
2.5. Teor de humidade.....	30
2.6. Origem dos dados meteorológicos .....	32
3. Metodologia Experimental.....	34
3.1. Amostragem .....	34
3.2. Estações meteorológicas .....	35
4. Análise e discussão dos resultados.....	38
4.1. Precisão das tabelas.....	38
4.2. Histórico meteorológico.....	39
4.3. Influência da utilização de dados obtidos por amostragem.....	40
4.4. Relação com os incêndios .....	42
5. Conclusões .....	46
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	47
Anexo A - Instruções de uso das tabelas dos Serviços Florestais Canadianos .....	50
Anexo B – Fluxograma de uso das tabelas dos Serviços Florestais Canadianos.....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Fluxograma do FWI ( <i>Canadian Wildland Fire Information System   Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System</i> , [s.d.]) .....	15
Figura 1.2. Valores de FWI no ano de 2020 na Lousã (dados IPMA) e divisão das classes de risco de incêndio de acordo com Viegas et al., 2004.....	17
Figura 1.3. Fluxograma do FLI.....	18
Figura 1.3. Componentes da estrutura operacional do AFDRS ( <i>AFAC   Australian Fire Danger Rating System</i> , [s.d.]-b) .....	19
Figura 1.4. Fluxograma do ICRIF.....	19
Figura 1.5. Matriz de ponderação de risco (Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2020).....	20
Figura 1.6. Analisador de humidade A&D ML-50.....	22
Figura 1.7. Sensor CS506 .....	22
Figura 2.1. Localização dos laboratórios de apoio (fonte: Google Maps).....	27
Figura 2.2. Gráfico comparativo da qualidade da implementação das equações .....	29
Figura 2.3. Trecho da folha de cálculo do método Meteorológico para o mês de 07/2020 na Lousã.....	30
Figura 2.4. Trecho da folha de cálculo do método Misto para o mês de 07/2020 na Lousã.....	31
Figura 2.5. Gráfico comparativo dos teores de humidade obtidos com as equações e condições meteorológicas (Van Wagner, 1987) e com o uso de amostragens .....	31
Figura 3.1. Mapa com as localizações das estações IPMA (a laranja) e VC (a azul).....	37
Figura 4.1. Gráfico comparativo da qualidade das tabelas .....	38
Figura 4.2. Gráfico comparativo das origens de dados relativo a Lousã.....	39
Figura 4.3. Gráfico comparativo das origens de dados relativo a Viseu .....	40
Figura 4.4. Gráfico comparativo do uso das amostragens para o concelho da Lousã .....	41
Figura 4.5. Gráfico comparativo do uso das amostragens para o concelho de Viseu.....	41
Figura 4.6. Número de ocorrências totais em cada classe de risco.....	43
Figura 4.7. Área ardida total em cada classe de risco .....	43
Figura 4.8. Gráfico de ocorrências diárias por FWI .....	44
Figura 4.9. Gráfico de área ardida diária por FWI, com escala logarítmica na ordenada ...	44

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1.1. Índices componentes do CFFDRS .....	15
Tabela 1.2. Limites de FWI que definem as classes de risco de incêndio florestal em Portugal Continental segundo (Viegas et al., 2004).....	16
Tabela 3.1. Vegetação característica dos concelhos .....	34
Tabela 3.2. Estações do IPMA utilizadas.....	36
Tabela 3.3. Estações utilizadas nas interpolações do Visual Crossing .....	36

## **SIGLAS**

AA – Área Ardida

ADAI – Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial

AFDRS – Australian Fire Danger Rating System

AVHRR – Advanced Very High-Resolution Radiometer

BUI – Buildup Index

CFDRS – Canadian Forest Fire Danger Rating System

CFS – Canadian Forest Service

DC – Drought Code

DMC – Duff Moisture Code

EVI – Enhanced Vegetation Index

FFMC – Fine Fuel Moisture Code

FLI – Fire Load Index

FWI – Fire Weather Index

GVMÍ – Global Vegetation Moisture Index

ICNF – Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas

ICRIF – Índice Combinado de Risco de Incêndio Florestal

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera

IPV – Instituto Politécnico de Viseu

ISD – Integrated Surface Database

ISI – Initial Spread Index

LCOI – Lightning-Caused Occurrence Index

LEIF – Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais

MCOI – Man-Caused Occurrence Index

MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

NDVI – Normalized Difference Vegetation Index

NFRDS – National Fire Danger Rating System

NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration

RCM – Risco Conjuntural e Meteorológico

ST – Surface Temperature

TH – Teor de Humidade

VC – Visual Crossing

VPD – Vapour-Pressure Deficit

## **1. INTRODUÇÃO**

Dado oxigénio suficiente, basta haver combustível e uma fonte de ignição para o fogo começar e se propagar (Meijer, 2014). No contexto florestal, o combustível trata-se da vegetação, a fonte de ignição pode ser natural (raios, clima seco, erupções vulcânicas, etc.) ou atividade humana (equipamentos, fogueiras, fogos de artifício, etc.) (National Wildfire Coordinating Group, 1998) e o incêndio pode ser planeado com o intuito de limpar o terreno para o cultivo de plantações ou, na sua forma que requer mais atenção, indesejado e descontrolado. Para combater e controlar estes incêndios, é fundamental o entendimento dessas duas vertentes, na figura das condições de humidade do combustível e a restrição de atividades que sejam de maior risco para a geração de um fogo nas alturas de condições mais favoráveis para a propagação.

### **1.1. Motivação**

Em Portugal, o ano de 2017 foi excepcionalmente calamitoso em termos de incêndios florestais, com mais de 100 pessoas mortas, um elevado número de estruturas afetadas e uma área queimada de aproximadamente 500.000 ha (Viegas et al., 2019). Esta catástrofe ocorreu na sequência de um longo período de elevadas temperaturas e de seca extrema. Este cenário já tinha sido verificado em Portugal em 2003, quando ocorreu também uma onda de calor significativa que atingiu a Europa. No futuro breve, numa vasta área do território de Portugal, alguns dos riscos climáticos de maior prioridade e que necessitam de uma resposta urgente, prendem-se fundamentalmente com as secas e ondas de calor, as quais têm uma significativa implicação no aumento do risco e consequência dos incêndios florestais (*Sobre – MCFIRE*, [s.d.]).

#### **1.1.1. Projeto MCFIRE**

O MCFire é um projeto iniciado em 2018 pela Associação para o Desenvolvimento da Aerodinâmica Industrial (ADAI) que pretende contribuir com a



investigação dos efeitos das alterações climáticas a nível nacional, nomeadamente no aumento do risco de incêndio florestal. No âmbito do projeto, são medidos os teores de humidade de diversos combustíveis característicos de quatro locais de medição, nomeadamente Faro, Lousã, Viana do Castelo e Viseu. O projeto é responsável por gerir uma plataforma informática onde os resultados obtidos serão disponibilizados, em tempo real, às entidades ambientais e ao público geral em <https://adai.pt/mcfire/>.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo primário deste trabalho é melhorar a previsão da ocorrência de incêndios florestais ao utilizar medições do teor de humidade (TH) de combustíveis finos na rotina de cálculo do risco de incêndio florestal utilizado em Portugal no lugar de estimativas. O novo modelo será validado com as estatísticas de área ardida (AA) e o número de ocorrências de incêndios no país constantes na base de dados do Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF) nos anos de 2018 a 2020.

## **1.3. Estado da arte**

### **1.3.1. Sistemas de cálculo do risco do incêndio**

Devido ao dano potencial causado por incêndios florestais, existe o interesse de prevê-lo com o objetivo de, na ocorrência destes, os recursos humanos e tecnológicos estarem melhor preparados para a contenção do fogo e seu impacto. Sendo assim, dois pontos de vista comumente abordados na construção de um modelo que busca resumir o risco de incêndio a um índice são os de perigo e de requerimentos (Wybo et al., 1995). Perigo inclui componentes associadas a prevenção, ignição, propagação e combate enquanto requerimentos significa a noção de prioridades baseadas no meio ambiente e propriedades na zona de efeito do fogo, sendo que a diferença dos métodos entre si inclui alguns fatores como a complexidade, escolha de parâmetros, metodologia utilizada e escolha dos componentes estudados (Wybo et al., 1995).

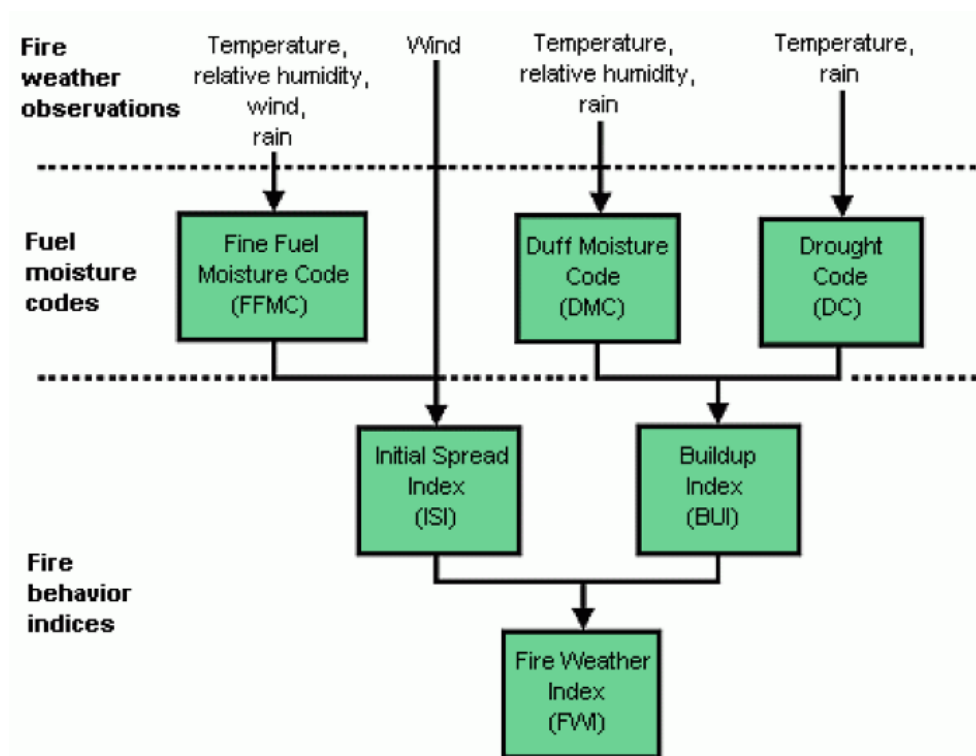
A definição de risco de incêndio mais comumente utilizada é normalmente expressa como uma resultante tanto de fatores constantes (tipo de combustível, topografia) quanto de variáveis (condições meteorológicas) que afetam a ignição, propagação e dificuldade de controlo do fogo e do seu dano causado (Wybo et al., 1995).

A importância das condições meteorológicas no incêndio florestal é bem reconhecida, logo a capacidade de prever o seu impacto na ocorrência dos fogos tem sido um dos grandes objetivos de pesquisadores desde o início da ciência do fogo (Viegas et al., 1999). O clima afeta o teor de humidade da vegetação através de vários processos físicos como absorção de vapor de água, condensação, evaporação e dessorção, além de contato direto com água líquida de precipitação (Meijer, 2014). Em razão dessa relação entre meteorologia e fogo, os dados meteorológicos obtidos nas estações são de grande importância na construção dos modelos a seguir.

#### **1.3.1.1. CFFDRS (*Canadian Forest Fire Danger Rating System*)**

Em Portugal, utiliza-se uma adaptação do *Fire Weather Index* (FWI), criado pelos serviços florestais canadianos como parte do CFFDRS (*Canadian Forest Fire Danger Rating System*) e calibrado para o território português (Viegas et al., 1992, 1999, 2001, 2004). Este modelo é utilizado nacionalmente por ter obtido o melhor resultado geral em um estudo que comparava cinco métodos distintos de avaliação do risco de incêndio, utilizando dados estatísticos de regiões em França, Itália e Portugal (Viegas et al., 1999), e é interpretado como um indicador literal da atividade de fogo, ou seja, como um índice do risco de ocorrência de fogos (Fernandes, 2005).

O FWI foi desenvolvido com os objetivos de, entre outros, melhorar a coordenação entre as forças federais de combate a incêndios e prover base estatística para uma contínua melhoria da formulação de políticas ambientais (Van Wagner, 1987). O seu cálculo se baseia em medidas diárias consecutivas, tomadas ao meio-dia, de temperatura (T), humidade relativa (HR), velocidade do vento (V) e precipitação (P). Com esses dados e as equações (Van Wagner & Pickett, 1985) ou tabelas (Canadian Forestry Service, 1984), obtêm-se seis índices integrantes do FWI. O registo diário deve ser iniciado assim que tiver um risco mensurável de fogo na primavera. A Figura 1.1 descreve graficamente o cálculo e a Tabela 1.1 o resume.



**Figura 1.1.** Fluxograma do FWI (Canadian Wildland Fire Information System | Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System, [s.d.])

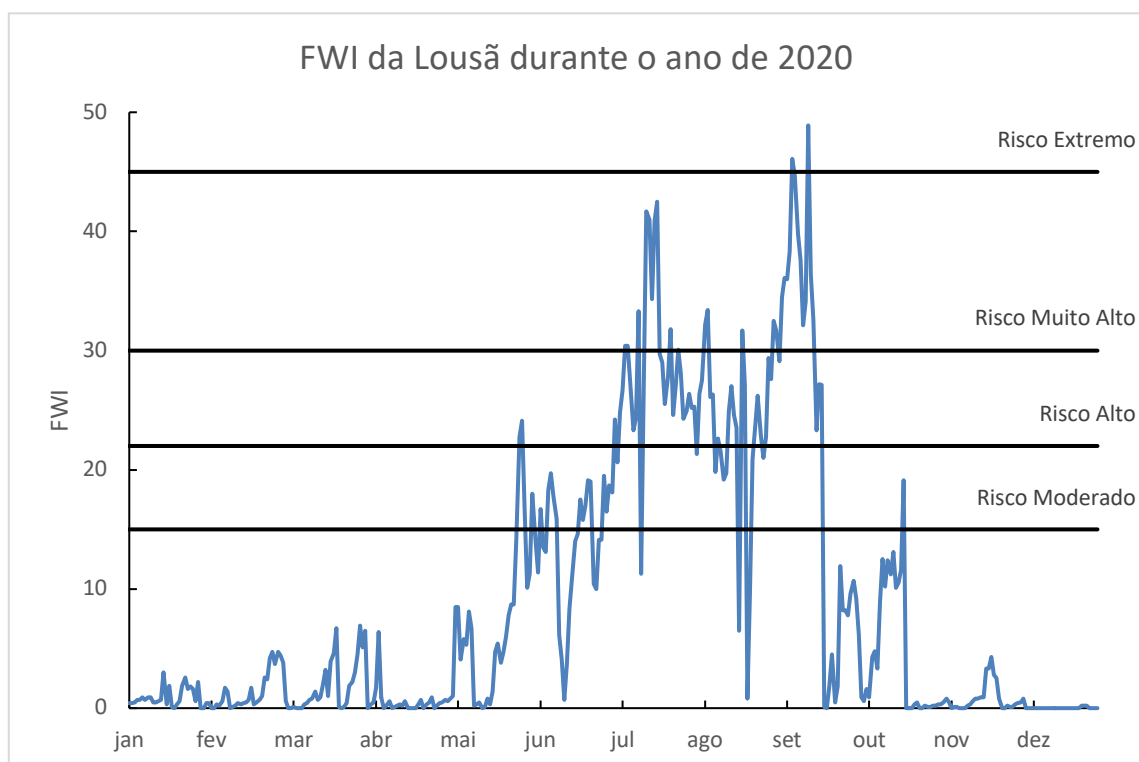
**Tabela 1.1.** Índices componentes do CFFDRS

Sigla	Parâmetros	Descrição
FFMC	T, HR, V, P	TH médio dos combustíveis finos depositados na superfície
DMC	T, HR, P	TH médio de camadas orgânicas de profundidade moderada
DC	T, P	TH médio de camadas orgânicas ainda mais profundas
ISI	V, FFMC	velocidade esperada de propagação do fogo
BUI	DMC, DC	quantidade total de combustível disponível para queima
FWI	ISI, BUI	intensidade do fogo

Para além do valor numérico, também é vantajoso descrever o risco de incêndio qualitativamente, na forma de classes de risco. A gama de FWI é dividida em cinco classes de risco: Baixo, Moderado, Alto, Muito Alto e Extremo. Cada classe é limitada por um valor de FWI calibrado através de percentis com estatísticas do histórico de incêndios (número de ocorrências e área ardida) para a região onde é feita a análise. A Tabela 1.2 representa os resultados do estudo (Viegas et al., 2004) que definiu os limites superior e inferior para todos os distritos de Portugal Continental e a Figura 1.2 exemplifica os valores absolutos que o índice alcançou em 2020 na Lousã. Além deste, destaca-se o estudo (Alves et al., 2014) que calibra as classes de risco para o território europeu.

**Tabela 1.2.** Limites de FWI que definem as classes de risco de incêndio florestal em Portugal Continental segundo (Viegas et al., 2004)

Distritos	Classes de Risco				
	Baixo	Moderado	Alto	Muito Alto	Extremo
Viana do Castelo	<10	15	30	45	>45
Braga	<10	15	30	50	>50
Porto	<8	15	25	40	>40
Vila Real	<13	20	30	50	>50
Bragança	<23	30	45	55	>55
Aveiro	<10	17	23	40	>40
Viseu	<15	25	45	70	>70
Guarda	<8	15	25	50	>50
Coimbra	<15	22	30	45	>45
Leiria	<15	25	30	50	>50
C. Branco	<20	35	45	60	>60
Lisboa	<25	35	50	70	>70
Santarém	<25	33	50	60	>60
Setúbal	<30	40	55	70	>70
Portalegre	<35	50	65	75	>75
Évora	<40	50	65	75	>75
Beja	<40	50	65	75	>75
Faro	<30	40	60	75	>75



**Figura 1.2.** Valores de FWI no ano de 2020 na Lousã (dados IPMA) e divisão das classes de risco de incêndio de acordo com Viegas et al., 2004

### 1.3.1.2. NFDRS (National Fire Danger Rating System)

Uma alternativa ao FWI, desenvolvida e aplicada nos Estados Unidos desde 1978, é o *National Fire Danger Rating System* (NFDRS). Este constrói subíndices e parte de observações distintas em relação ao canadiano, onde as três principais componentes são o LCOI (Lightning-Caused Occurrence Index), MCOI (Man-Caused Occurrence Index) e BI (Burning Index) e a avaliação final do risco de incêndio expresso pelo FLI (*Fire Load Index*) (Bradshaw et al., 1983).

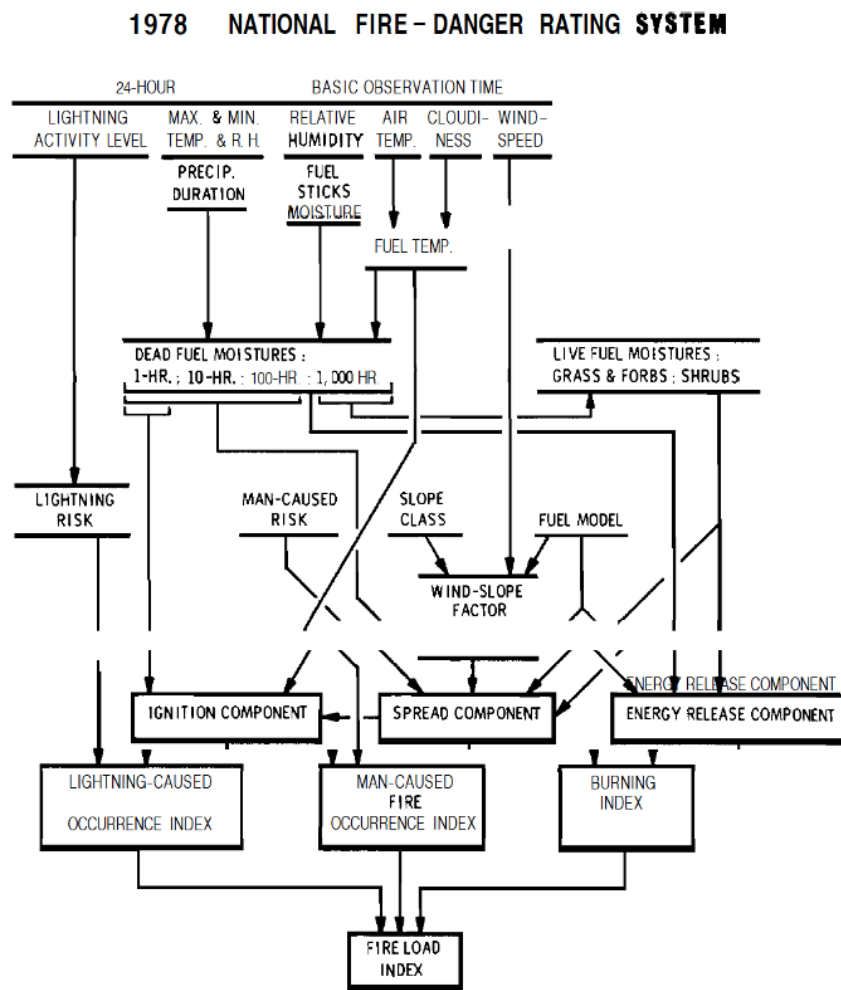
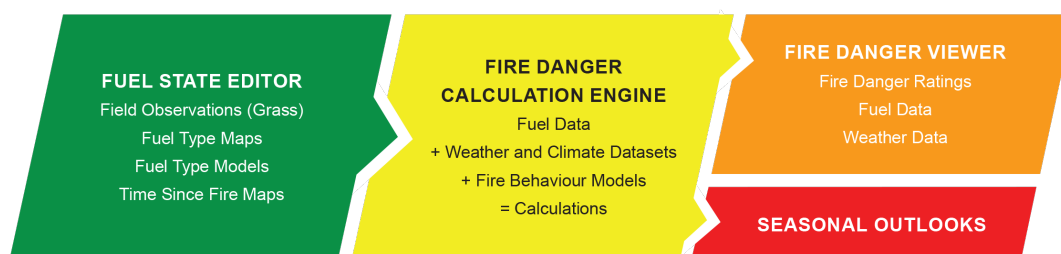


Figura 1.3. Fluxograma do FLI

### 1.3.1.3. AFDRS (Australian Fire Danger Rating System)

O desenvolvimento de um novo sistema de risco de incêndio surgiu como uma prioridade nacional na Austrália em 2014, e em 2015 começou-se um projeto visando o seu desenvolvimento e aplicação. Este projeto, atualmente na 3ª fase, contou com um estudo de viabilidade (Cube Group, 2014) e custo-benefício (Cube Group, 2015) na fase 1 e um protótipo de índice de comportamento do fogo (Matthews, 2019) na fase 2, que foi testado com fogos do mundo real e obteve previsões melhores que as do sistema anterior. O desenvolvimento do sistema está em andamento desde julho de 2019 e prevista para ser finalizada em junho de 2022. Na fase 3 prevê-se um aperfeiçoamento do sistema com base em descobertas da fase anterior e o desenvolvimento de um software que colete a análise

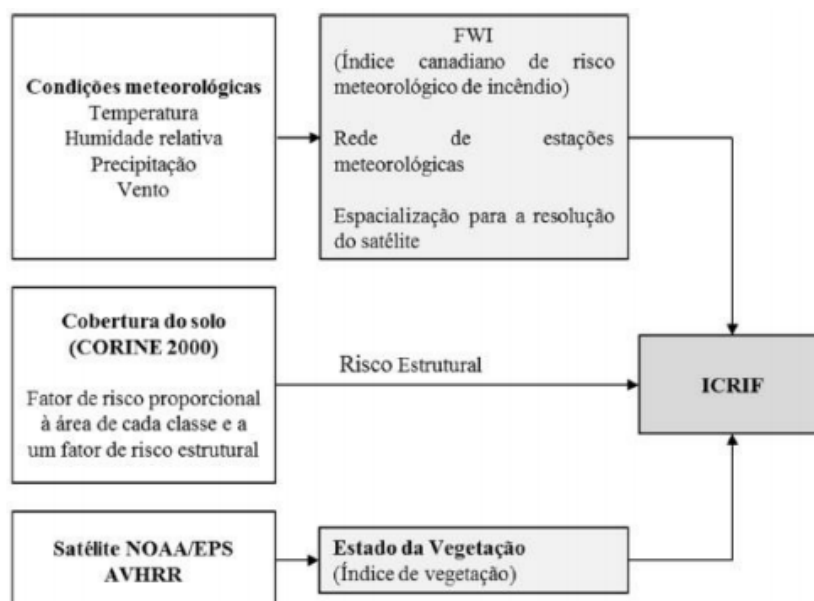
dados para prover as agências responsáveis (AFAC | *Australian Fire Danger Rating System*, [s.d.]-a).



**Figura 1.4.** Componentes da estrutura operacional do AFDRS (AFAC | *Australian Fire Danger Rating System*, [s.d.]-b)

#### 1.3.1.4. Outros índices

Destaca-se também a existência de diversos índices que, mesmo não sendo o principal sinalizador do risco de incêndio de um país, possuem significados importantes e podem ser usados em utilidades específicas e com resultados pontualmente melhores. Um exemplo é o Índice Combinado de Risco de Incêndio Florestal (ICRIF), que associa informações de diferentes fontes para uma nova percepção do risco de incêndio. Neste caso, são utilizados o FWI (canadiano), um mapa de risco estrutural e imagens do satélite NOAA-AVHRR, cujo processamento é discutido na secção 1.3.2.4. Aqui, seu maior valor está na inserção do mapa, que é obtido para cada píxel a porcentagem da área coberta por cada uma das classes de ocupação do solo da Carta CORINE (Caetano et al., 2009).



**Figura 1.5.** Fluxograma do ICRIF

Outro exemplo é o Índice de Risco de Incêndio Rural (RCM). Também utilizado em Portugal para o público geral, este une o FWI à perigosidade de incêndio rural que integra uma componente estrutural decadal e uma componente conjuntural anual, que tem em consideração as áreas ardidadas do último triénio. A integração dos dois índices é realizada pela aplicação da matriz de ponderação de risco da Figura 1.6.

		FWI (classes)				
		1 (0.0 – 8.4)	2 (8.5 – 17.1)	3 (17.2 – 24.5)	4 (24.6 – 38.2)	5 (> 38.2)
P E R I G O S I D A D E	1	1	1	1	2	3
	2	1	1	2	2	3
	3	1	1	2	3	4
	4	1	2	3	4	5
	5	1	2	3	4	5

Figura 1.6. Matriz de ponderação de risco (Instituto Português do Mar e da Atmosfera, 2020)

### 1.3.2. Teor de Humidade de Combustíveis Finos

Pode definir-se um combustível florestal como sendo o material orgânico, vivo ou morto, que pode ser consumido num incêndio florestal (Lopes, 2013). Os combustíveis de diâmetro inferior a 0,6 cm, chamados de combustíveis finos, são os que tem um papel mais importante nas fases de ignição e propagação de um incêndio (Lopes, 2013) e, dada a importância do seu teor de humidade em todos os sistemas de previsão de incêndio florestal, foram criados também modelos que fazem essa estimativa. Serão destacados quatro métodos, nos quais são utilizados coleta de amostras, sensores para a medição diretamente no local, um modelo semi-empírico e um que se utiliza de imagens de satélites.

Os dados coletados, independentemente do método, podem ser utilizados diretamente no FWI através da equação (1.1) (Van Wagner, 1987; Van Wagner & Pickett, 1985) para obter valores do “índice de humidade de combustíveis finos” (FFMC) mais fidedignos.

$$FFMC = 59,5 * \frac{(250 - TH)}{(147,2 + TH)} \quad (1.1)$$



### 1.3.2.1. Amostragem

O método mais tradicional e tecnologicamente mais antigo é o de recolha de amostras. A recolha de uma amostra da vegetação é feita e armazenada hermeticamente para ser transportada a um laboratório, onde serão feitas pesagem, secagem e nova pesagem, para assim determinar o teor de humidade através da equação (1.2), onde  $m_i$  é a massa inicial e  $m_s$  a massa seca.

$$TH = \frac{(m_i - m_s)}{m_s} \quad (1.2)$$

A vantagem é que, asseguradas as condições ideais de transporte da amostra ao laboratório e de secagem, será obtida a massa seca com exatidão. Por isso, esse costuma ser o método que valida os seguintes. As desvantagens residem na complicada logística do supracitado transporte e demora no processo de secagem, impedindo a monitorização “em tempo real” da vegetação, aumentando os custos da operação e adicionando um ponto de falha relevante tanto à frequência e à qualidade dos resultados que é a necessidade de uma pessoa fisicamente colher os exemplares.

O processo de secagem é normalmente feito numa estufa a 105°C por um período igual ou superior a 24h, causando a demora supracitada. Alternativamente, existem também analisadores eletrónicos, como o da Figura 1.7, que fornecem o teor de humidade de amostras após uma análise de 10 minutos. Estes contam com uma balança de alta precisão, uma lâmpada de halogéneo de 400W para o aquecimento e resolução de 0,1%. Em (Lopes, 2013), ao comparar o teor de humidade determinado com recurso do analisador com o valor obtido por secagem em estufa (metodologia descrita na secção 3.1), encontrou-se erro sem uma tendência definida, variando de 0 a 70%, e dispersão significativa dos erros verificados.



Figura 1.7. Analisador de humidade A&D ML-50

#### 1.3.2.2. Sensor de humidade de combustível

O sensor da Figura 1.8, fabricado pela *Campbell Scientific*, mede a variação da constante dielétrica num pedaço de madeira acoplado, específico e fabricado propriamente para este fim, que simula o combustível natural e está exposto às mesmas condições climáticas (Campbell Scientific, 2015). As principais vantagens desse método em relação ao primeiro é que os resultados podem ser obtidos à distância e com menor esforço, assim aumentando a frequência de medições e reduzindo o custo e a complexidade do sistema.

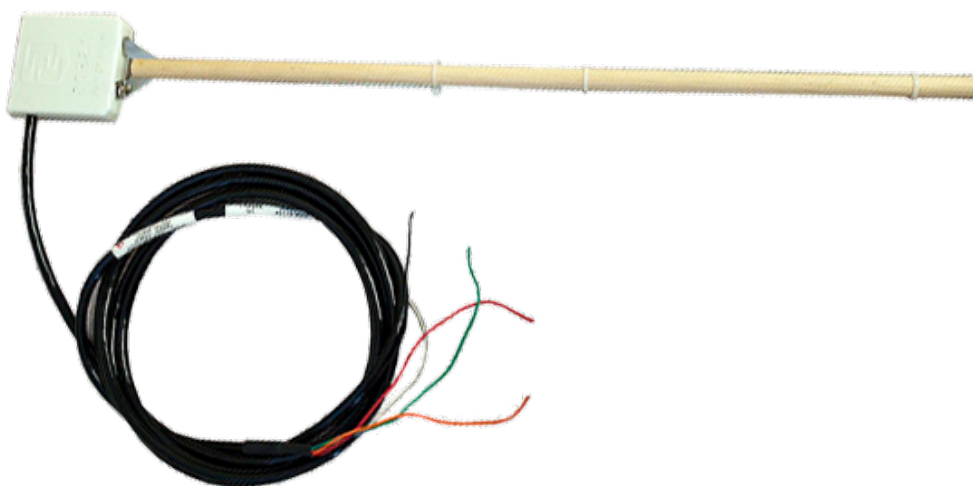


Figura 1.8. Sensor CS506

Como detalhado no manual, a técnica de medição consiste em componentes eletrônicos de alta velocidade na placa de circuito que são configurados para oscilar quando a energia é aplicada. A saída do circuito é conectada a uma vareta, também da *Campbell Scientific*, que atua como um guia de ondas. A frequência de oscilação e, portanto, o sinal de saída do circuito depende da constante dielétrica do meio ao redor das tiras de aço inoxidável, que por sua vez é predominantemente dependente do teor de humidade do combustível. O circuito digital dimensiona a frequência de oscilação para uma faixa apropriada para medição dos *data loggers*.

Destacam-se a metodologia e as conclusões de alguns trabalhos que utilizam o sensor como (Schunk et al., 2014) que encontrou boa comparabilidade entre sensores e excelente correlação com o teor de humidade de combustíveis mortos de secagem rápida; e (Bovill et al., 2015) cujos resultados indicaram que os sensores podem ser calibrados localmente para aprimorar a identificação de tendências do TH e melhorar a tomada de decisão de queimadas planeadas, porém não são indicados para monitorização na escala sub-diária.

### 1.3.2.3. Deficit de Vapor (VPD)

Proposto por (Resco de Dios et al., 2015), este modelo de previsão do teor de humidade de combustíveis finos utiliza como entrada apenas informações meteorológicas e propõe um declínio exponencial do TH com o *deficit* de vapor (D), definido como a diferença entre a humidade relativa do ar e o quanto de humidade este mesmo ar comporta quando saturado (Prenger & Ling, 2001). Portanto, a base do cálculo é a difusão de vapor d'água entre o tecido vegetativo e a atmosfera. O teor de humidade é dado por:

$$TH_D = TH_0 + TH_1 e^{(-mD)} \quad (1.3)$$

onde  $TH_0$  e  $TH_0+TH_1$  são os valores mínimo e máximo de teor de humidade medidos e  $m$  é o parâmetro de calibração. O deficit de vapor é calculado em função da temperatura do ar e respetiva humidade relativa, através das seguintes equações (Nolan et al., 2016):

$$e_s = 0,6108 * \exp\left(17,27 * \frac{T_{ar}}{T_{ar} + 237,7}\right) \quad (1.4)$$

$$e_a = \frac{HR}{100} * e_s \quad (1.5)$$

$$D = e_s - e_a \quad (1.6)$$

Estudos de validação do VPD com dados do sensor e comparado com outros modelos de previsão, aquele apresentou os menores valores de erro médio absoluto e erro médio enviesado, podendo-se concluir que é um método eficaz para a estimativa do teor de humidade de combustíveis finos e de simples aplicação, necessitando apenas de uma estimativa da declividade da relação de teor de humidade com D e do conhecimento da faixa de TH. Por ter sido validado em locais diferentes do qual foi parametrizado, o modelo é generalizável e não específico para dado local.

#### 1.3.2.4. Imagens de satélite

Trata-se de um método empírico desenvolvido por (Chuvieco et al., 2004) baseado em análises multi-temporais de imagens do satélite NOAA-AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radiometer*, do *National Oceanic and Atmospheric Administration*). Após processamento destas imagens, obtêm-se valores para o índice normalizado de diferença de vegetação (NDVI) e para a temperatura de superfície (ST). O NDVI estaria positivamente correlacionado com o TH devido à redução de clorofila quando a planta seca. Para o ST, pelo contrário, é esperada uma correlação negativa já que o efeito arrefecedor da evapotranspiração é diminuído quando as plantas introduzem mecanismos para reduzir a perda de água.

Por se tratar de um método empírico, há a forte dependência do período de calibração, que deve ser feito consoante o local e o tipo de vegetação em questão. Além disso, também existe na formulação um fator correspondente a uma função do dia do ano. As equações (1.7) e (1.8) são exemplos encontrados pelo autor para pastagens e *Cistus ladanifer* na Espanha.

$$TH_g = -57,103 + 284,808 * NDVI - 0,089 * ST + 136,75 * FD_g \quad (1.7)$$

$$TH_c = 70,195 + 53,520 * NDVI - 1,435 * ST + 122,087 * FD_c \quad (1.8)$$

Outro trabalho que também explora a relação entre imagens de satélite e o teor de humidade de combustíveis é (Argañaraz et al., 2016). Este utiliza imagens do MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) de florestas no Chile para obter os mesmos parâmetros NDVI, ST e outros índices espectrais que traduzem diferentes

características da vegetação como o índice de vegetação aprimorado (EVI) e o índice global de humidade da vegetação (GVMI), que foram utilizados nas equações conforme os seus coeficientes de correlação na fase de validação do modelo.

## 2. METODOLOGIA CONCEITUAL

### 2.1. Modelo de previsão do risco de incêndio

Como o trabalho está inserido no contexto português do combate a incêndios florestais, será utilizado o sistema nacional, baseado no índice canadiano FWI. Portanto, para as localidades (Lousã e Viseu) e período temporal (jan/18 a jul/21) a seguir definidos, através do método descrito, serão calculados os valores de todos os subíndices componentes deste sistema com a intenção de analisar os seguintes aspetos:

- **Discrepância no cálculo utilizando as equações (Van Wagner & Pickett, 1985) ou as tabelas (Canadian Forestry Service, 1984);**
- **Influência da origem dos dados meteorológicos na análise (dados oficiais vs. dados disponíveis publicamente);**
- **Valores puramente meteorológicos vs. uso de dados de amostragem quando disponíveis;**
- **Relação com a ocorrência de fogos e área ardida do distrito na área de estudo.**

### 2.2. Escala espacial

Como localidades de estudo foram escolhidos os concelhos de Lousã e Viseu. Devido à estrutura do Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF) e do Instituto Politécnico de Viseu (IPV), são os locais que possuem a base de dados de amostragem mais completa no país.

O LEIF situa-se no Aeródromo da Lousã, tem uma área de 1.152m<sup>2</sup> e 11m de altura e constitui a mais importante estrutura dedicada à investigação experimental dos incêndios florestais existente na Europa. Desde 1985, este laboratório desenvolve investigação aplicada em vários temas relacionados com o comportamento do fogo e a segurança pessoal (*Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF)*, [s.d.]) e monitoriza desde 1986 o teor de humidade dos combustíveis frequentes na floresta da Região Centro de Portugal (Viegas et al. 2004).

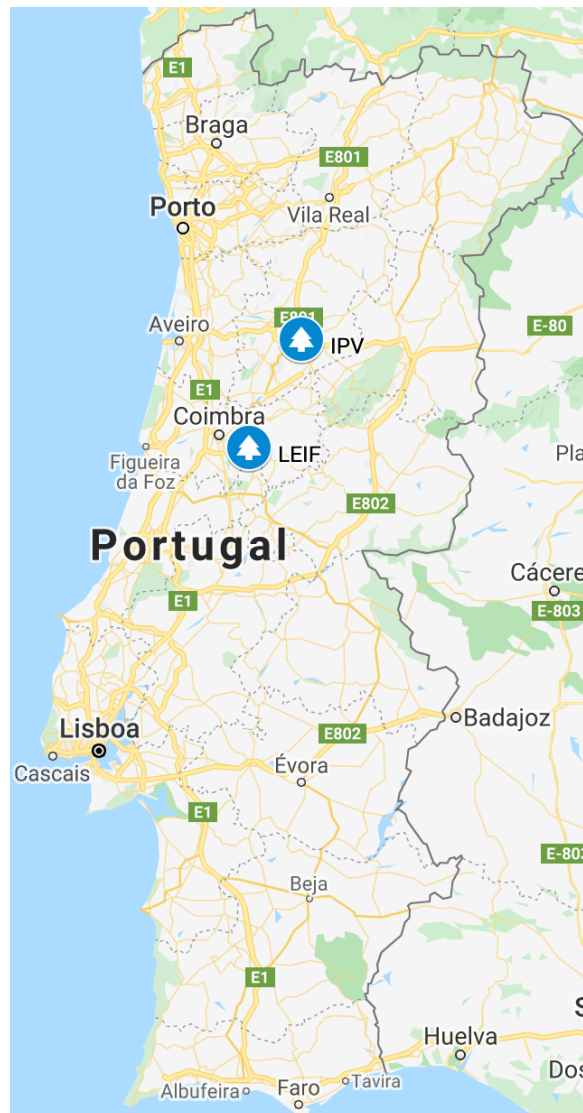


Figura 2.1. Localização dos laboratórios de apoio (fonte: Google Maps)

### 2.3. Escala temporal

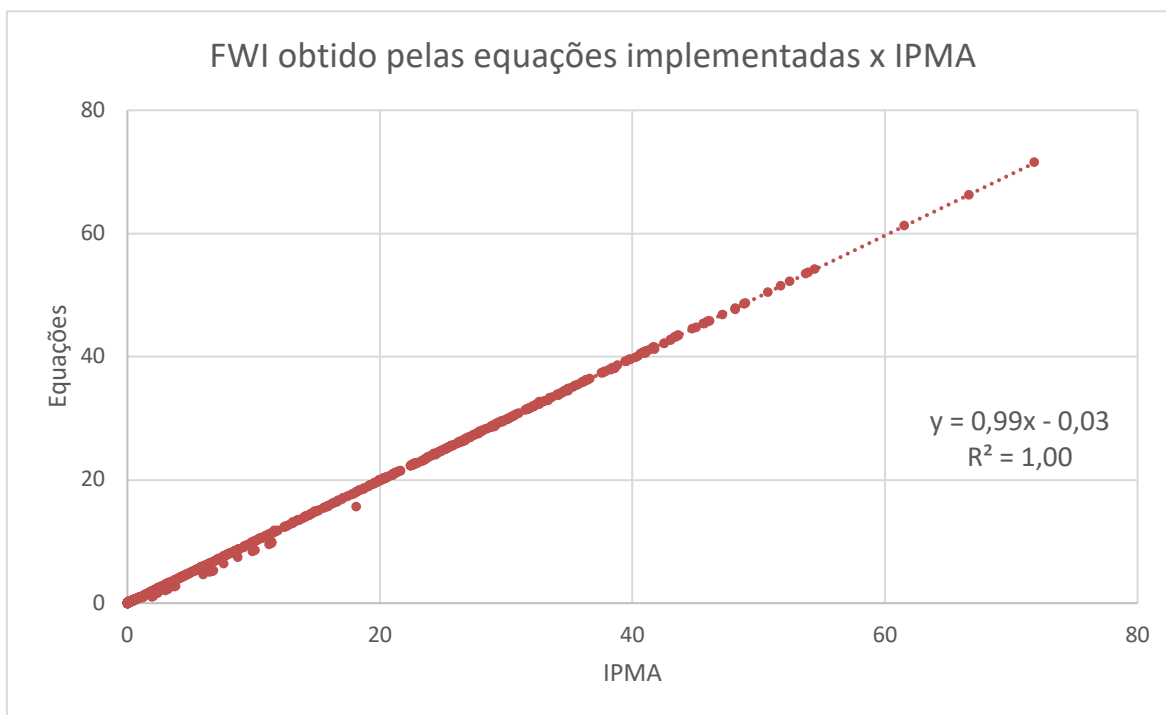
É fundamental que o espaço amostral seja o maior possível, desde que mantida a fiabilidade dos dados de entrada. Sendo assim, a janela de tempo utilizada corresponde ao período total de 3 anos e 7 meses compreendido entre 01/01/2018 e 31/07/2021. A data inicial coincide com o início dos trabalhos de medição do teor de humidade de combustíveis finos do projeto MCFire em ambos os locais de estudo, e a data de fim com os últimos dados obtidos antes do fechamento da análise desta dissertação.

## 2.4. Método de cálculo

Foram utilizadas folhas de cálculo em *MS Excel* para proceder os cálculos mencionados na secção 2.1. Com o objetivo de investigar a possível discrepância entre resultados obtidos através das tabelas do serviço canadiano (CFS) ou das equações de Van Wagner, foram procedidos os cálculos das duas formas. As linhas representam os diferentes dias consecutivos, enquanto ao longo das colunas são elencados as condições meteorológicas e, nas seguintes, implementadas como fórmulas as equações conforme descritas em (Van Wagner, 1987; Van Wagner & Pickett, 1985), sendo que cada célula contém o valor de um parâmetro que é utilizado. Por pressupor medições ininterruptas, é necessária uma estimativa inicial para os índices de teor de humidade FFMC, DMC e DC relativos ao dia anterior ao primeiro dia do período, que seria 31/12/2017. Foi utilizada a sugestão da bibliografia FFMC = 85, DMC = 6 e DC = 15 (Canadian Forestry Service, 1984; Van Wagner, 1987; Van Wagner & Pickett, 1985).

Devido à grande quantidade de equações e complexidade de tal implementação, foi feito o gráfico que compara os valores calculados nesta dissertação com os valores oficiais fornecidos pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) para um mesmo conjunto de medições meteorológicas. O coeficiente  $R^2$  da Figura 2.2 igual a 1 indica que implementação das equações foi bem-sucedida, podendo atribuir o pequeno erro à estimativa inicial dos índices de teor de humidade.





**Figura 2.2.** Gráfico comparativo da qualidade da implementação das equações

Alternativamente, o FWI pode ser calculado usando as tabelas disponibilizadas pelo CFS, que foram transcritas para o livro em *MS Excel* e calculou-se o FWI conforme seria feito se utilizando apenas desta informação, de acordo com a rotina do Anexo A. Este método é útil por ser mais simples de ser aplicado em campo, onde apenas com a posse destas tabelas e das medições meteorológicas, consegue-se obter rapidamente o risco de incêndio, eliminando a necessidade de máquinas de calcular e poupando o tempo e energia gastos neste processo.

Por final, a última coluna contém a classificação qualitativa associada ao FWI quantitativo de acordo com a Tabela 1.2. Esta ajuda a resumir o nível de atenção requerido das autoridades de gestão de incêndios às épocas do ano. No total serão 4 folhas de cálculo distintas, 2 da Lousã e 2 de Viseu, cada uma por um dos seguintes métodos:

- Método “Meteorológico”, que faz uso apenas da informação meteorológica e calcula o FWI através da forma descrita por Van Wagner (1987) (Figura 2.3);
- Método “Misto”, que será descrito na secção 2.5 (Figura 2.4).



Data	T	R	H	W	Amost.	(ontem)														(ontem)														(ontem)														Risco
						FFMC	m <sub>1</sub>	r <sub>1</sub>	m <sub>2</sub>	E <sub>1</sub>	k <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	k <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	k <sub>3</sub>	E <sub>4</sub>	k <sub>4</sub>	m	FFMC	DMC	r <sub>1</sub>	m <sub>1</sub>	b	M <sub>1</sub>	P <sub>1</sub>	L <sub>1</sub>	K	DMC	DC	r <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	Q <sub>2</sub>	Q <sub>3</sub>	D <sub>1</sub>	L <sub>1</sub>	V	DC	f(W)	f(R)	ISI	BUI	f(D)	B	FWI				
01/07/2020	25,2	0,0	68,0	8,3	11,8											89,1	90						90	12	0	91,6	388							388	6	16	396,4	2	18	5,7	116,1	31	18	22,9	Alto			
02/07/2020	23,8	0,0	52,0	14,0	8,6										92,2	92						92	12	0	94,4	396							396	6	16	404,4	2	28	11,7	119,2	31	37	37,7	Muito Alto				
03/07/2020	25,7	0,0	50,0	7,2	8,4										92,4	94						94	12	0	97,6	404							404	6	17	412,7	1	29	8,6	122,6	32	27	31,1	Muito Alto				

Figura 2.4. Trecho da folha de cálculo do método Misto para o mês de 07/2020 na Lousã

A Figura 2.5 traz um exemplo da comparação entre o teor de humidade obtido com as amostragens e o teórico a partir do FFMC das equações (Van Wagner, 1987). O período escolhido para o exemplo é o verão de 2020 (20/06/2020 a 22/09/2020) por ter sido o período com a maior frequência de medições, logo onde aparecem as maiores diferenças entre os métodos.

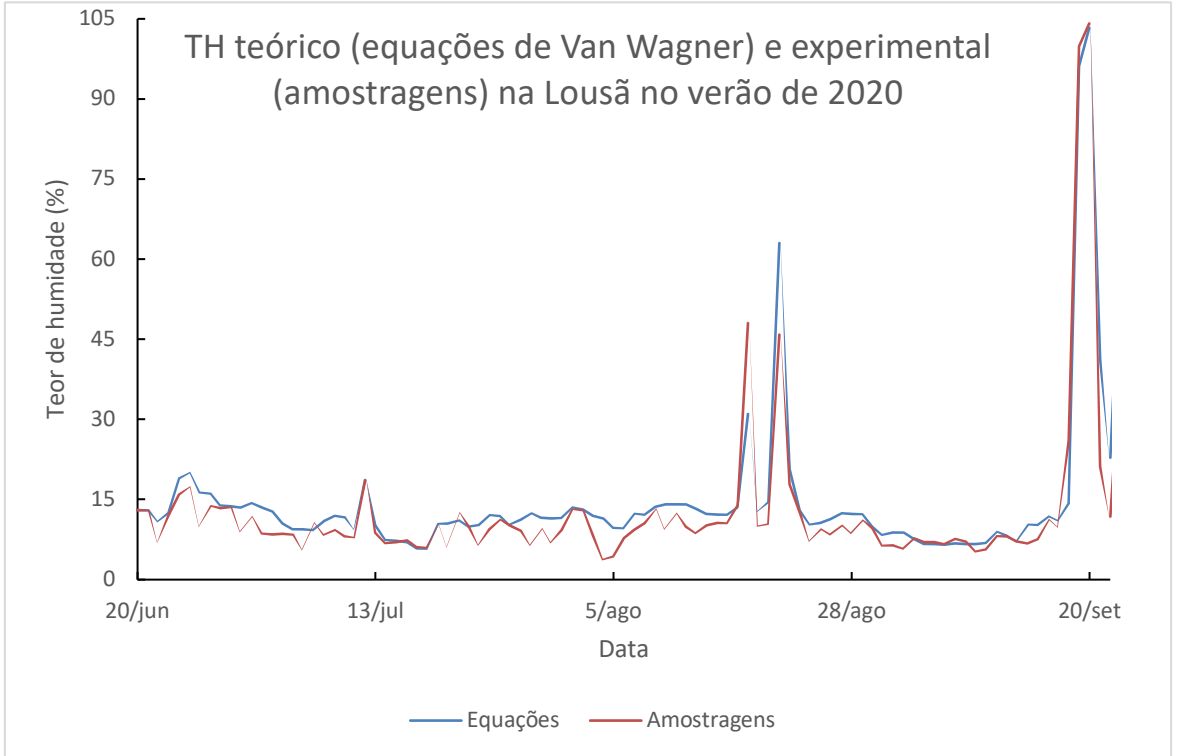


Figura 2.5. Gráfico comparativo dos teores de humidade obtidos com as equações e condições meteorológicas (Van Wagner, 1987) e com o uso de amostragens

## 2.6. Origem dos dados meteorológicos

O FWI é um parâmetro que depende inteiramente das condições meteorológicas fornecidas pelas estações meteorológicas que se supõe representarem as condições médias numa determinada região. Assim sendo, este conjunto de parâmetros é de crucial importância e será analisada a influência que mudar as estações que originam os dados tem sobre o cálculo do FWI.

Os dados históricos meteorológicos não estão abertamente disponíveis ao público, pelo menos através de fontes oficiais e confiáveis. As redes de estações meteorológicas, de forma geral, realizam interpolações de medições feitas nas suas estações para calcular os parâmetros meteorológicos que são apresentados diariamente como, por exemplo, temperaturas (mínima, média e máxima), humidade relativa, precipitação, radiação solar, etc. A primeira parte da análise será no sentido de mensurar esta diferença, utilizando os dados oficiais do IPMA e o histórico obtido da rede online *Visual Crossing* (VC).

O IPMA é um instituto público, integrado na administração indireta do Estado, e assume as responsabilidades ao nível do território nacional nos domínios do mar e da atmosfera (IPMA - O IPMA, [s.d.]). Já a *Visual Crossing Corporation* foi fundada em 2003 e possui experiência em análise de dados meteorológicos e sistemas de mapeamento (*About us | Visual Crossing*, [s.d.]). O *website* mostrou ser um dos poucos que fornece dados gratuitamente, dentro do limite de 1.000 rótulos temporais por dia, e possibilita aos usuários obtê-los em formatos que podem ser analisados ou importados para vários outros sistemas, incluindo *Excel*. Sua principal (mas não única) fonte de informação é o *Integrated Surface Database* (ISD), do NOAA (*How We Process the NOAA Integrated Surface Database Historical Weather Data – Visual Crossing Weather*, [s.d.]). Esta se apresenta como uma alternativa quando o histórico oficial não estiver disponível, portanto será feita a análise à fiabilidade desta via.

No contexto de investigação académica para esta dissertação, e no âmbito do Projeto FireStorm “A Meteorologia e o Comportamento de Tempestades de Fogo” com a referência PCIF/GFC/0109/2017, no qual a ADAI e o IPMA são participantes, o IPMA partilhou com a ADAI os dados meteorológicos diários e as componentes do sistema canadiano dos anos 2018, 2019 e 2020 para a estação meteorológica da Lousã (598) e de

Viseu (560). Para o mesmo período, foram comparados os valores de FFMC e FWI que resultam da utilização desta base e do VC como entradas.

### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A monitorização através de sensores era um objetivo inicial da tese, porém a aquisição dos sensores de humidade dos combustíveis finos sofreu atrasos devido à pandemia do COVID-19 e à burocracia de compra sob a qual a entidade parceira está sujeita, ao longo prazo de entrega do fornecedor e à necessidade de um período inicial de calibração/ajustes. Portanto, os dados utilizados são oriundos de amostragens feitas durante o período temporal definido na secção 2.3 e o uso dos sensores fica como proposta de trabalho futuro.

#### 3.1. Amostragem

Desde 2018, o MCFire monitoriza o valor de TH de combustíveis através do método da amostragem, tanto na Lousã (desde 12/01/18) quanto em Viseu (a partir de 27/05/2019) e em outros locais de estudo do projeto. Neste processo, um colaborador recolhe a vegetação (habitualmente referida como combustível) de uma encosta com vertente virada a sul, entre as 12h e 13h (hora local), duas vezes por semana durante o inverno e diariamente durante o verão. Depois de recolhida a vegetação, esta é guardada num saco hermético (que evita a contaminação das amostras) e analisada no laboratório, levando o menor tempo possível entre colheita e a análise. A vegetação recolhida é representativa do estrato arbustivo e varia conforme o local, cujas características estão resumidas na Tabela 3.1.

**Tabela 3.1.** Vegetação característica dos concelhos

Nome	Espécie	Coimbra	Viseu
Urze	<i>Calluna vulgaris</i>	x	
Carqueja viva	<i>Chamaespartium tridentatum</i>	x	
Queiró	<i>Erica umbellata</i>		x
Folhada	<i>Eucaliptus globulus</i>	x	x
Caruma	<i>Pinus pinaster</i>	x	x
Tojo	<i>Ulex europaeus</i>		x

Após a receção da colheita no laboratório, são separadas quatro amostras de 5,0g de cada tipo de vegetação, que habitualmente é referida também como combustível florestal.

As amostras são colocadas numa estufa a 105°C por um período mínimo de 24h, para posteriormente serem pesadas novamente. Ao adaptar a equação (1.2) e inserir a nova massa  $m_s$  em gramas, o teor de humidade será dado pela equação (3.1):

$$TH = \frac{5}{m_s} - 1 \quad (3.1)$$

De forma a garantir sempre a disponibilidade da informação para o mesmo dia, também é separada uma amostra que é colocada no analisador eletrónico da Figura 1.7, que fornece o resultado dentro de 10 minutos. Este valor é então inserido numa curva de ajuste (Lopes et al., 2006) e tira-se o TH do próprio dia. Este valor fica disponível na plataforma informática do MCFire até que se obtenha o a massa das amostras da estufa, que devido à sua maior precisão, substitui aquele. Tal procedimento permite que, em aplicações na qual o TH atual seja necessário, utilize-se uma estimativa melhor que o valor do dia anterior.

O pinheiro bravo (*Pinus pinaster*) compõe cerca de 60% da floresta da região central de Portugal (Lopes et al., 2006), logo a caruma, consistente em agulhas de pinheiro secas, é o combustível predominante depositado na superfície destas florestas. Em (Viegas et al., 1992), foi vista a dependência entre o TH de agulhas de pinheiro e a probabilidade da ocorrência de pelo menos um incêndio e a média de ocorrências diárias; em (Lopes, 2013) é confirmada a elevada representatividade espacial do *Pinus pinaster* em relação às espécies presentes nas zonas centro e norte de Portugal. Assim sendo, o teor de humidade da caruma foi utilizado como representativo dos combustíveis finos e inserido nos cálculos do método “Misto”, descrito na secção 2.5.

## 3.2. Estações meteorológicas

As estações cujos dados foram fornecidos pelo IPMA são apresentadas na Tabela 3.2, cada uma referente a um dos concelhos do estudo. As utilizadas nas interpolações do VC, mais numerosas, estão dispostas na Tabela 3.3 e o mapa com todas elas apresentado na Figura 3.1. Nas tabelas, o parâmetro “distância” é referente à distância entre a estação e o “contexto” que é o ponto de recolha de vegetação (Lousã ou Viseu). Os restantes parâmetros são o código da estação (ID.), a latitude (LAT.) e a longitude (LONG.) no sistema decimal e a elevação (ELEV.) da estação em metros.

**Tabela 3.2.** Estações do IPMA utilizadas

Nome	Distância	ID.	LAT.	LON.	ELEV.	Contexto
<b>LOUSÃ/AERÓDROMO</b>	0,1 km	697	+40,144	-8,244	+51 m	Lousã
<b>UISEU/AERÓDROMO</b>	7,9 km	560	+40,715	-7,896	+636 m	Viseu

**Tabela 3.3.** Estações utilizadas nas interpolações do Visual Crossing

Nome	Distância	ID.	LAT.	LON.	ELEV.	Contexto
<b>COIMBRA</b>	16,0 km	85490	+40,200	-8,417	+140 m	Lousã
<b>COIMBRA/CERNACHE</b>	19,0 km	85480	+40,150	-8,467	+179 m	Lousã
<b>FIGUEIRA</b>	51,0 km	C4666	+40,174	-8,838	+94 m	Lousã
<b>FERMENTELOS</b>	53,0 km	D5475	+40,566	-8,523	+18 m	Lousã
<b>SEIA</b>	59,0 km	E9353	+40,455	-7,686	+440 m	Lousã
<b>MONTE REAL</b>	65,0 km	85400	+39,831	-8,887	+57 m	Lousã
<b>PENHAS DOURADAS</b>	66,0 km	85680	+40,417	-7,550	+1388 m	Lousã
<b>UISEU</b>	71,0 km	85600	+40,717	-7,883	+644 m	Lousã
<b>CASTELO BRANCO</b>	74,0 km	85700	+39,833	-7,483	+384 m	Lousã
<b>UISEU</b>	8,4 km	85600	+40,717	-7,883	+644 m	Viseu
<b>SEIA</b>	29,0 km	E9353	+40,455	-7,686	+440 m	Viseu
<b>PENHAS DOURADAS</b>	40,0 km	85680	+40,417	-7,550	+1388 m	Viseu
<b>FERMENTELOS</b>	52,0 km	D5475	+40,566	-8,523	+18 m	Viseu
<b>COIMBRA</b>	65,0 km	85490	+40,200	-8,417	+140 m	Viseu
<b>OUAR/MACEDA</b>	67,0 km	85440	+40,917	-8,633	+22 m	Viseu
<b>OUAR</b>	68,0 km	85581	+40,916	-8,646	+17 m	Viseu
<b>VILA REAL</b>	72,0 km	85660	+41,317	-7,733	+481 m	Viseu
<b>COIMBRA/CERNACHE</b>	72,0 km	85480	+40,150	-8,467	+179 m	Viseu
<b>PORTO/SERRA DO PILAR</b>	79,0 km	85460	+41,133	-8,600	+100 m	Viseu



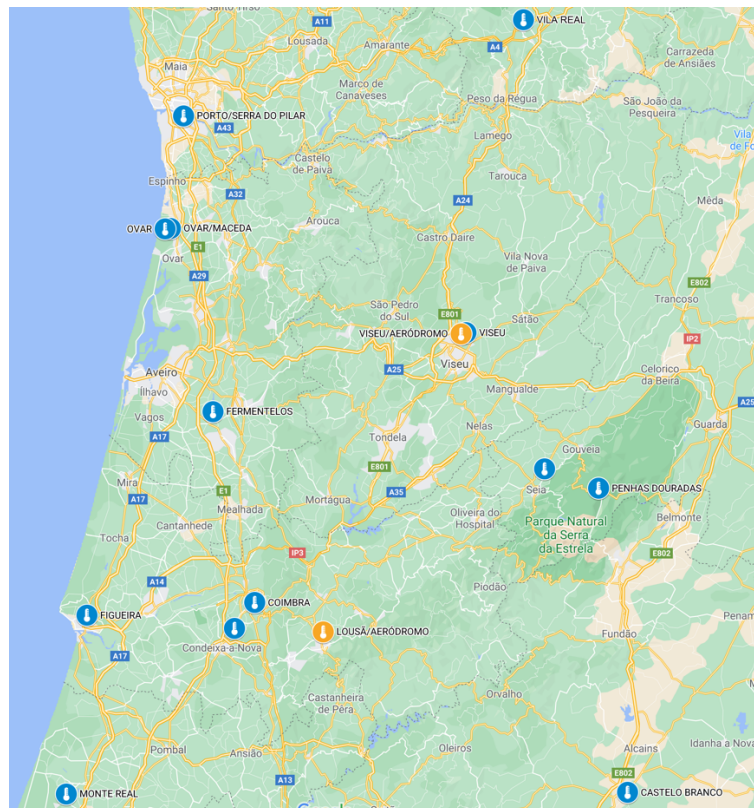


Figura 3.1. Mapa com as localizações das estações IPMA (a laranja) e VC (a azul).

## 4. ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 4.1. Precisão das tabelas

Na Figura 4.1 apresenta-se o gráfico com os resultados obtidos de FWI para comparação entre as tabelas do serviço canadiano e as equações (Van Wagner, 1987) como métodos de cálculo do FWI. Os valores de FWI através das equações são referentes aos valores fornecidos pelo IPMA. A correlação linear, com média superior a 0,95, indica que as tabelas são uma alternativa viável em casos onde não se dispõe de grandes meios de cálculo. Para o caso desta dissertação, onde não há essa limitação, todas as análises serão feitas utilizando as equações.

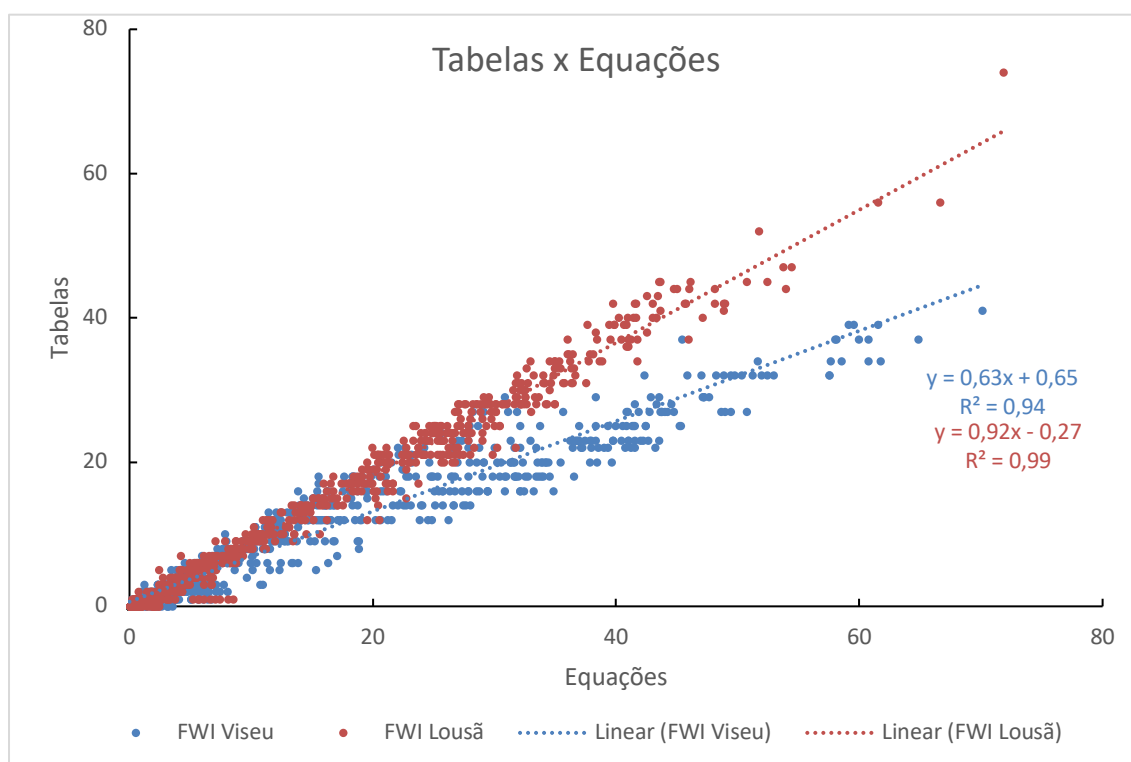


Figura 4.1. Gráfico comparativo da qualidade das tabelas

## 4.2. Histórico meteorológico

As Figura 4.2 e Figura 4.3 mostram os pontos de FWI (vermelho) e FFMC (azul) associados às datas da secção 2.3 calculados com cada um dos conjuntos de dados meteorológicos (IPMA e VC), bem como as retas de regressão linear, as respetivas equações e os coeficientes de correlação  $R^2$ .

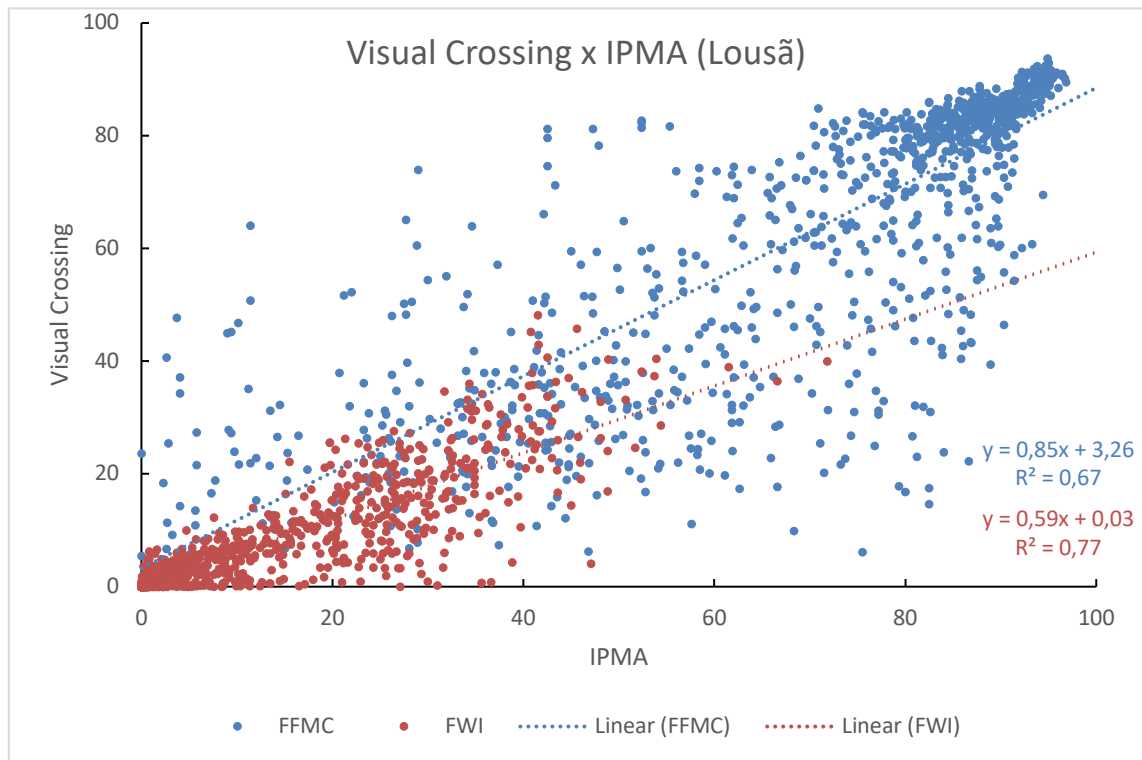


Figura 4.2. Gráfico comparativo das origens de dados relativo a Lousã

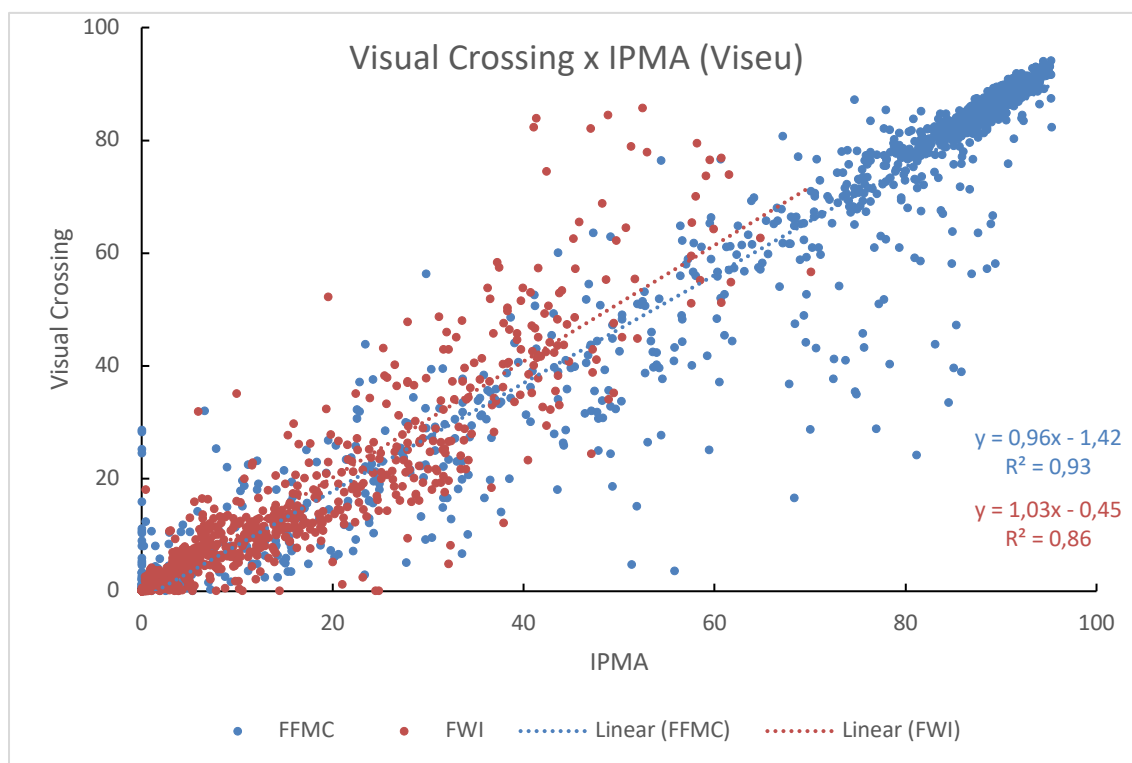


Figura 4.3. Gráfico comparativo das origens de dados relativo a Viseu

O valor médio de  $R^2$  das quatro retas é igual a 0,81, demonstrando a forte correlação entre os conjuntos. Assim sendo, os dados oriundos do VC serão utilizados para completar a lacuna onde não foi possível obter os dados meteorológicos pelo IPMA, nomeadamente os 7 meses do ano de 2021.

Nota-se também uma diferença entre o  $R^2$  de Lousã e de Viseu. Isso pode ser explicado pelo fato de, nas interpolações do VC, terem sido utilizadas estações mais próximas da estação da do IPMA.

### 4.3. Influência da utilização de dados obtidos por amostragem

As Figura 4.4 e Figura 4.5 comparam o FFMC (azul) e o FWI (vermelho) nos dias em que foi utilizada informação de amostragem, de acordo com a metodologia explicitada na secção 2.5. Coeficientes  $R^2$  menores indicam maiores discrepâncias entre os valores de humidade dos combustíveis finos teórico e real e, por assim dizer, maior influência das amostragens nos cálculos. A menor correlação linear na Lousã pode ser

justificada pelo facto de, neste concelho, a amostragem ter sido feita por um maior período de tempo, logo influenciar mais os resultados.

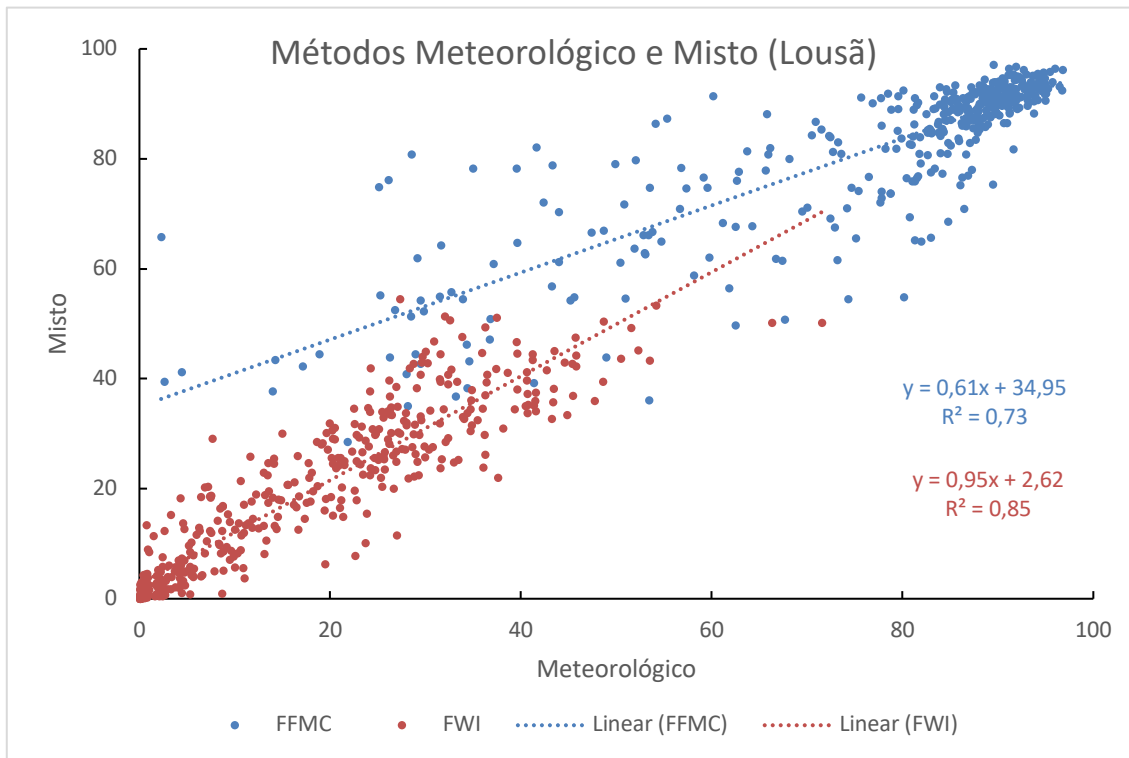


Figura 4.4. Gráfico comparativo do uso das amostragens para o concelho da Lousã

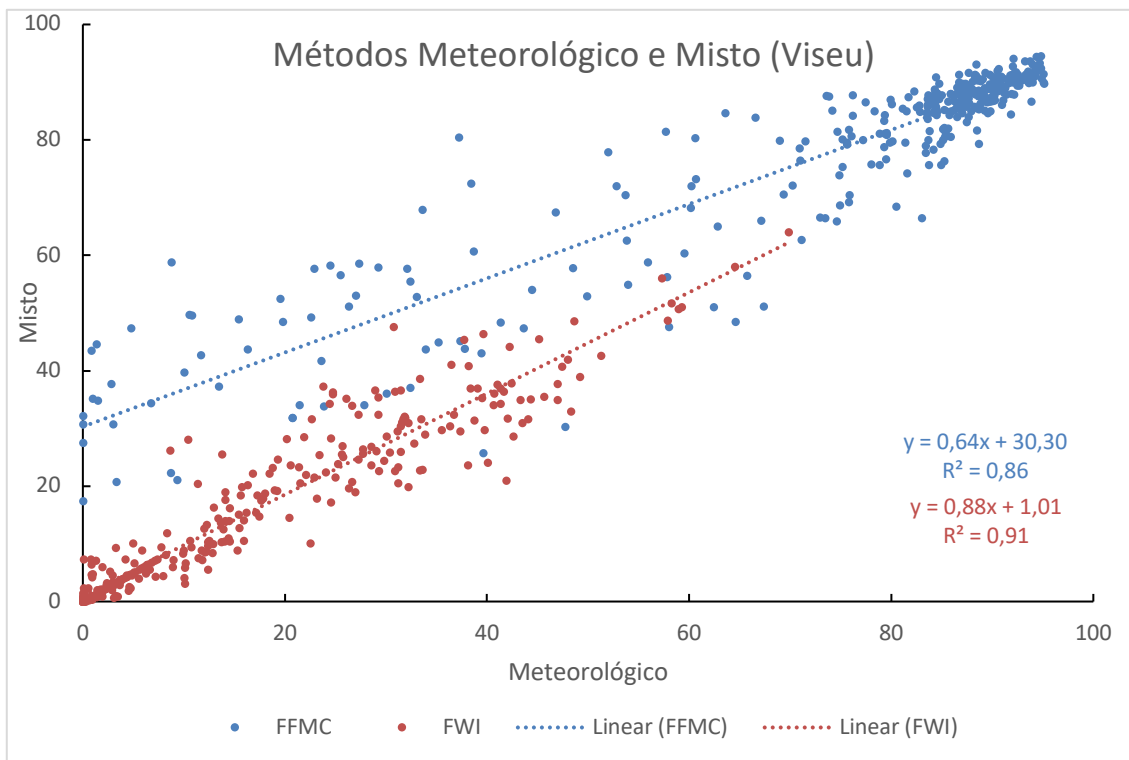


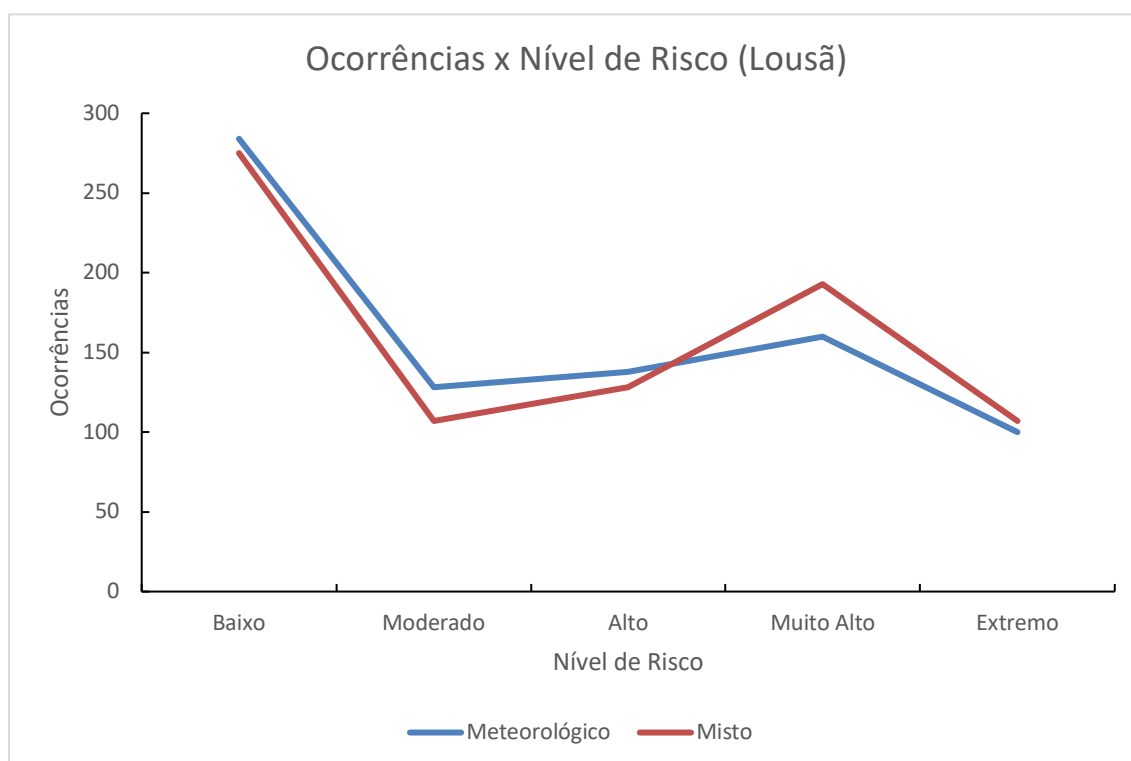
Figura 4.5. Gráfico comparativo do uso das amostragens para o concelho de Viseu

Com  $R^2$  médio de 0,80 para o FFMC e 0,88 para o FWI conclui-se que, como esperado, as amostragens têm maior efeito no valor numérico do FFMC, sendo esse efeito “amortecido” com a inclusão dos outros índices que não tem as amostragens em conta. Como trabalho futuro, propõe-se a medição do TH do solo a diferentes profundidades e sua inclusão no cálculo do DMC e DC.

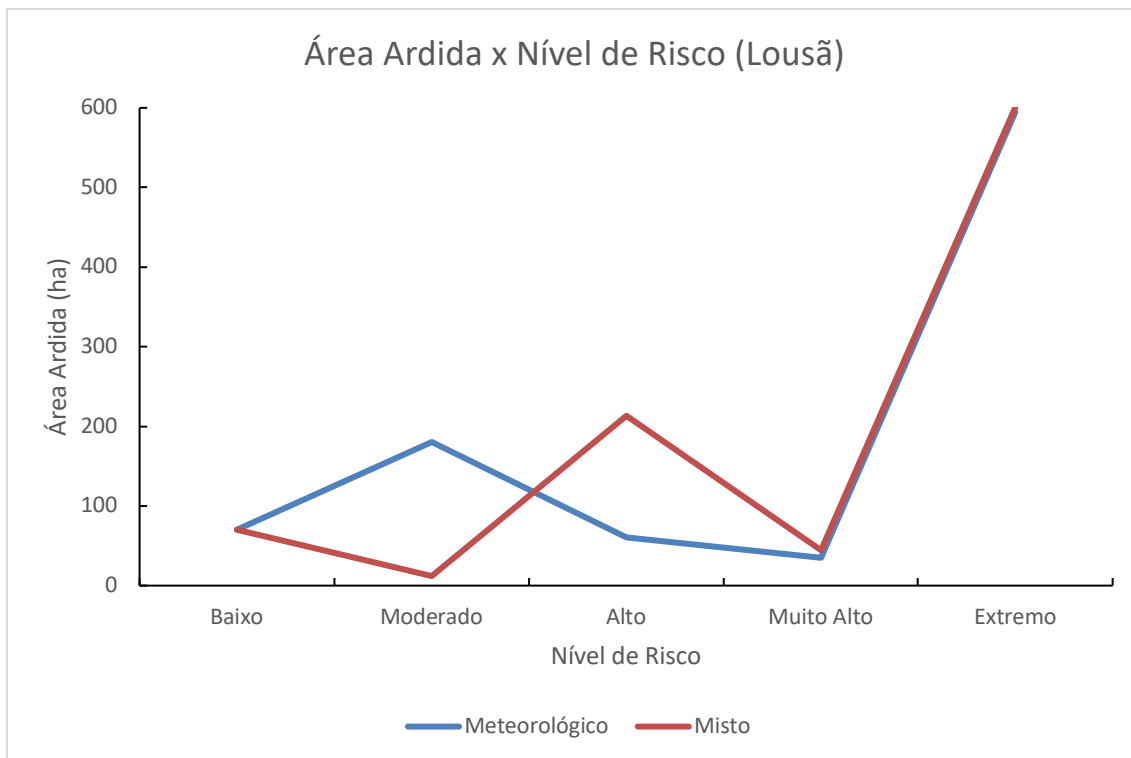
#### 4.4. Relação com os incêndios

A base de dados de incêndios do Instituto da Conservação da Natureza e das Florestas (ICNF) foi utilizada nos anos de 2018 a 2020 para a análise que se segue.

A Figura 4.6 e a Figura 4.7 ilustram, respetivamente, a relação entre o número de ocorrências (independentemente da área ardida) e a área ardida registadas na base de dados ICNF nos anos de 2018 a 2020 e as diferentes classes de risco em que dividem os valores do FWI. O nível de risco foi determinado de acordo com a Tabela 1.2. Observa-se que o maior número de incêndios ocorreu na classe de menor risco, o que é contraintuitivo, todavia pode ser explicado pelo facto deste nível concentrar a grande maioria dos dias (aproximadamente 70%). Estes são incêndios de menor proporção, demonstrado pela baixa área ardida total do nível na Figura 4.7.



**Figura 4.6.** Número de ocorrências totais em cada classe de risco



**Figura 4.7.** Área ardida total em cada classe de risco

Para ilustrar melhor a relação do FWI com o incêndio, foram traçados os gráficos das Figura 4.8 e Figura 4.9. Diferentemente das Figura 4.6 e Figura 4.7, o eixo das abscissas apresenta o valor médio do FWI e o eixo das ordenadas ajustado para mostrar as ocorrências e a área ardida diárias.

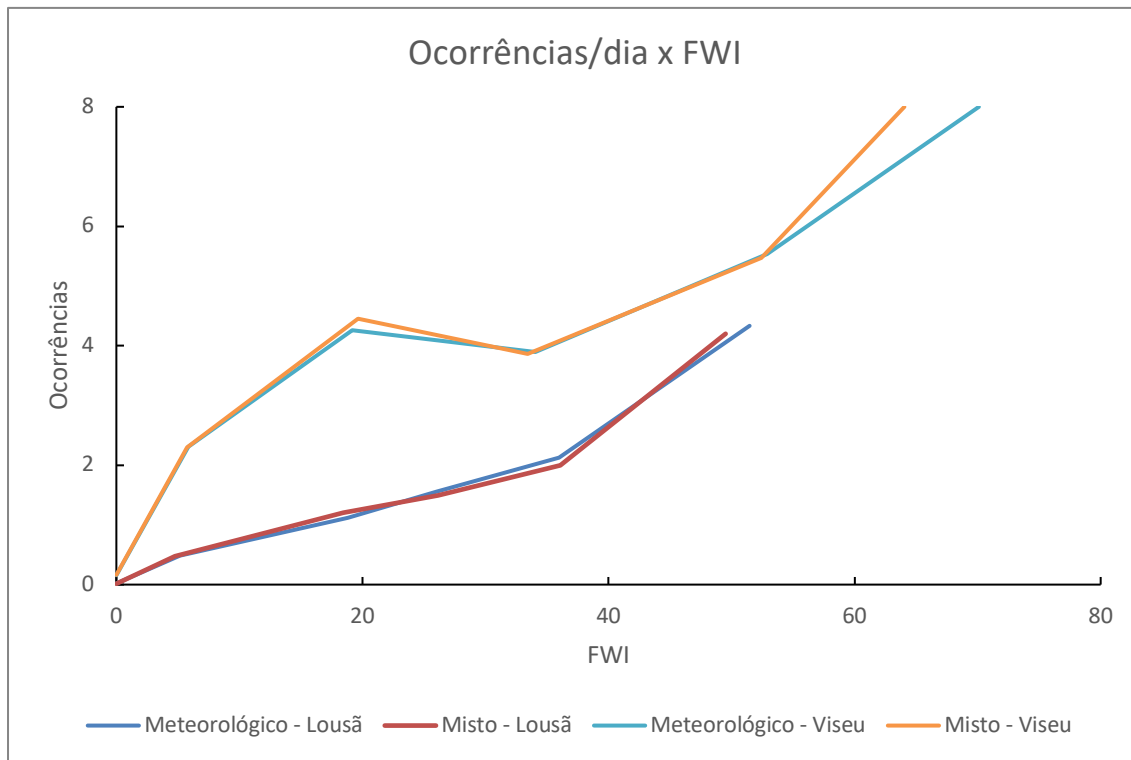


Figura 4.8. Gráfico de ocorrências diárias por FWI dividido pelas classes de risco

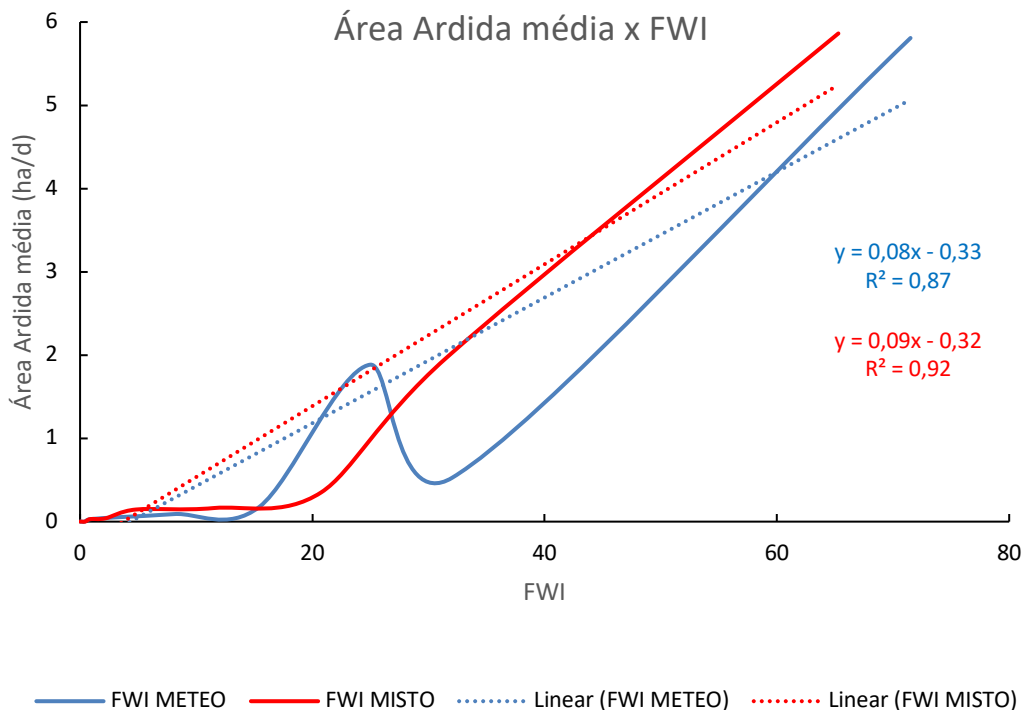


Figura 4.9. Gráfico de área ardida diária por FWI dividido por percentis, com escala logarítmica na ordenada

A Figura 4.8 comprova a relação positiva e proporcional entre o FWI e a ocorrência de incêndios que é mencionada na literatura (Viegas et al., 1999), mesmo para



um período temporal muito mais curto do que é normalmente usado em dados históricos. A relação não é tão direta na Figura 4.9, apesar da tendência crescente da área ardida com o FWI.

Na Figura 4.9 observa-se que, próximo ao eixo vertical, a AA no FWI misto é menor que no meteorológico, enquanto que a partir do que se considera um risco alto de incêndio, o FWI misto cruza a curva meteorológica e passa a representar áreas ardidas maiores, demonstrando que a utilização da amostragem conseguiu representar de forma mais precisa a situação real do perigo de propagação do fogo.

## 5. CONCLUSÕES

O FWI é uma poderosa ferramenta para a prevenção e combate de incêndios florestais. Ao unir condições meteorológicas com conhecimento de dinâmica do fogo, seus autores conseguiram simplificar, em apenas um índice, o perigo que o fogo representa a uma determinada região. As tabelas do CFS, ao serem usadas como forma alternativa de calcular o *Fire Weather Index*, mostraram-se confiáveis com  $R^2$  igual a 0,97. Estas tabelas têm a vantagem de serem extremamente mais simples do que as equações, logo são úteis quando os meios de cálculo (normalmente informáticos) não estão disponíveis.

Por sua natureza, o conjunto de informação meteorológica desempenha um papel central na previsão do risco de incêndio por este modelo. Para uma mesma região, diferentes estações levarão a valores absolutos diferentes para cada um daqueles componentes. Pôde-se concluir que a fonte do histórico meteorológico tem alta influência no resultado final, com  $R^2$  variando de 0,77 a 0,86 na comparação do FWI ao usar a fonte oficial vs. fontes online disponíveis ao público.

Observou-se uma boa correlação entre o FWI e o número de ocorrências de incêndio nos locais e período estudados. Para a área ardida, no entanto, a relação não é tão clara. A utilização dos dados de amostragem do teor de humidade dos combustíveis finos contribuiu para melhorar a correlação entre o FWI e a AA total, de forma que, no método misto (que faz uso das amostragens), é verificada menor AA nos dias com menos risco e maior nos dias com mais risco. Consequentemente, conclui-se que medições de TH afetam positivamente a organização do combate aos incêndios florestais, tendo menor influência na previsão das ocorrências. Como trabalho futuro, propõe-se um estudo que conte com maior frequência de medições e, se possível, a utilização de sensores que façam estas medidas em tempo real, de forma a dinamizar o cálculo e reduzir os custos da operação.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- About us | Visual Crossing.* ([s.d.]). Recuperado 16 de agosto de 2021, de <https://www.visualcrossing.com/about>
- AFAC | Australian Fire Danger Rating System.* ([s.d.]-a). Recuperado 15 de agosto de 2021, de <https://www.afac.com.au/initiative/afdrs/afdrs-overview/afdrs-background>
- AFAC | Australian Fire Danger Rating System.* ([s.d.]-b). Recuperado 15 de agosto de 2021, de <https://www.afac.com.au/initiative/afdrs/afdrs-overview/afdrs-design>
- Alves, D., Ribeiro, L. M., & Viegas, D. X. (2014). Calibration of the Canadian FWI system for the territory of Europe. *Advances in Forest Fire Research*, 1743–1748. [uri:http://hdl.handle.net/10316.2/34140](http://hdl.handle.net/10316.2/34140)
- Argañaraz, J. P., Landi, M. A., Bravo, S. J., Gavier-Pizarro, G. I., Scavuzzo, C. M., & Bellis, L. M. (2016). Estimation of Live Fuel Moisture Content From MODIS Images for Fire Danger Assessment in Southern Gran Chaco. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(12), 5339–5349. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2575366>
- Bovill, W., Hawthorne, S., Radic, J., Baillie, C., Ashton, A., Noske, P., Lane, P., & Sheridan, G. (2015). Effectiveness of automated fuelsticks for predicting the moisture content of dead fuels in Eucalyptus forests. *Proceedings - 21st International Congress on Modelling and Simulation, MODSIM 2015*, 201–207.
- Bradshaw, L. S., Deeming, J. E., Burgan, R. E., & Cohen, J. D. (1983). *The 1978 National Fire-Danger Rating System. July.* <https://doi.org/10.5962/bhl.title.98707>
- Caetano, M., Nunes, V., & Nunes, A. (2009). *CORINE Land Cover 2006 for Continental Portugal* (Número July). [http://mapas.dgterritorio.pt/atom-dgt/pdf-cous/CLC2006/CORINE\\_Land\\_cover\\_2006\\_for\\_Continental\\_Portugal.pdf](http://mapas.dgterritorio.pt/atom-dgt/pdf-cous/CLC2006/CORINE_Land_cover_2006_for_Continental_Portugal.pdf)
- Campbell Scientific. (2015). *CS506 Fuel Moisture Sensor Instruction Manual.*
- Canadian Forestry Service. (1984). *Tables for the Canadian Forest Fire Weather Index System* (4th ed.). For. Tech. Rep 25.
- Canadian Wildland Fire Information System | Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System.* ([s.d.]). Recuperado 7 de setembro de 2021, de <https://cwfis.cfs.nrcan.gc.ca/background/summary/fwi>
- Chuvieco, E., Cocero, D., Riaño, D., Martín, P., Martínez-Vega, J., De La Riva, J., & Pérez, F. (2004). Combining NDVI and surface temperature for the estimation of live fuel moisture content in forest fire danger rating. *Remote Sensing of Environment*, 92(3), 322–331. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.01.019>
- Cube Group. (2014). *Improving our National Fire Danger Rating System.* <http://journal.stainkudus.ac.id/index.php/equilibrium/article/view/1268/1127>
- Cube Group. (2015). *National Fire Danger Rating System (NFDRS): Illustrative Impact of Benefits and Costs.* <https://doi.org/10.1002/0471743984.vse8649>
- Fernandes, P. (2005). *Estudo de adaptação para Portugal do Sistema Canadano de Indexação do Perigo de Incêndio. January 2005.*
- How We Process the NOAA Integrated Surface Database Historical Weather Data – Visual Crossing Weather.* ([s.d.]). Recuperado 16 de agosto de 2021, de <https://www.visualcrossing.com/resources/documentation/weather-data/how-we->

- process-integrated-surface-database-historical-weather-data/  
Instituto Português do Mar e da Atmosfera. (2020). *Nota Metodológica - Cálculo do Índice de Risco de Incêndio Rural (RCM)*. 1–8.
- IPMA - O IPMA. ([s.d.]). Recuperado 16 de agosto de 2021, de <https://www.ipma.pt/oiipma/>
- Laboratório de Estudos sobre Incêndios Florestais (LEIF). ([s.d.]). Recuperado 15 de agosto de 2021, de <https://adai.pt/site/?module=publicRd&target=laboratoryDetails&id=2&laboratoryId=2>
- Lopes, S. M. G. (2013). *Modelos de previsão do teor de humidade de combustíveis florestais*.
- Lopes, S. M. G., Viegas, D. X., Viegas, M. T., & Lemos, L. T. de. (2006). Moisture content of fine forest fuels in the Central Portugal (Lousã) for the Period 1996–2004. *Forest Ecology and Management*, 234, S71. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2006.08.103>
- Matthews, S. (2019). *Australian Fire Danger Rating System Research Prototype*. National Wildfire Coordinating Group. (1998). *Wildfire Prevention Strategies. March*. *Wildfire Prevention strategies.pdf*
- Nolan, R. H., Resco de Dios, V., Boer, M. M., Caccamo, G., Goulden, M. L., & Bradstock, R. A. (2016). Predicting dead fine fuel moisture at regional scales using vapour pressure deficit from MODIS and gridded weather data. *Remote Sensing of Environment*, 174, 100–108. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.12.010>
- Prenger, J. J., & Ling, P. P. (2001). Greenhouse condensation control: understanding and using vapor pressure deficit (VPD). *The Ohio State University Extension*, page 3, 4.
- Resco de Dios, V., Fellows, A. W., Nolan, R. H., Boer, M. M., Bradstock, R. A., Domingo, F., & Goulden, M. L. (2015). A semi-mechanistic model for predicting the moisture content of fine litter. *Agricultural and Forest Meteorology*, 203, 64–73. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.01.002>
- Schunk, C., Leuchner, M., & Menzel, A. (2014). *Evaluation of a system for automatic dead fine fuel moisture measurements*. 1264–1274.
- Sobre – MCFIRE*. ([s.d.]). Recuperado 9 de agosto de 2021, de <https://adai.pt/mcfire/sobre/>
- Van Wagner, C. E. (1987). Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. In *Forestry Technical Report* (Número 35).
- Van Wagner, C. E., & Pickett, T. L. (1985). Equations and FORTRAN Program for the Canadian Forest Fire Weather Index System. In *Forestry Technical Report* (Número 33). Canadian Forestry Service.
- Viegas, D. X., Almeida, M. F., Ribeiro, L. M., Raposo, J., Viegas, M. T., Oliveira, R., Alves, D., Pinto, C., Rodrigues, A., Ribeiro, C., Lopes, S., Jorge, H., & Viegas, C. X. (2019). *Análise dos Incêndios Florestais Ocorridos a 15 de outubro de 2017*. <https://www.portugal.gov.pt/download-ficheiros/ficheiro.aspx?v=c2da3d7e-dcdb-41cb-b6ae-f72123a1c47d>
- Viegas, D. X., 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(4), 235–246. <https://doi.org/10.1071/wf00015>
- Viegas, D. X., Piñol, J., Viegas, M. T., & Ogaya, R. (2001). Estimating live fine fuels moisture content using meteorologically-based indices. *International Journal of Wildland Fire*, 10(2), 223–240. <https://doi.org/10.1071/WF01022>

- 
- Viegas, D. X., Reis, R. M., Cruz, M. G., & Viegas, M. T. (2004). Calibração do Sistema Canadano de Perigo de Incêndio para Aplicação em Portugal. *Silva Lusitana*, 12(1), 77–93.
- Viegas, D. X., Viegas, M. T. S. P., & Ferreira, A. D. (1992). Moisture content of fine forest fuels and fire occurrence in central portugal. *International Journal of Wildland Fire*, 2(2), 69–86. <https://doi.org/10.1071/WF9920069>
- Wybo, J. L., Guarniéri, F., & Richard, B. (1995). Forest fire danger assessment methods and decision support. *Safety Science*, 20(1), 61–70. [https://doi.org/10.1016/0925-7535\(94\)00067-D](https://doi.org/10.1016/0925-7535(94)00067-D)

## ANEXO A - INSTRUÇÕES DE USO DAS TABELAS DOS SERVIÇOS FLORESTAIS CANADIANOS

### CALCULATION INSTRUCTIONS

Record weather observations on a permanent monthly form. For one example, see Monthly Fire Weather Record on the inside back cover of this publication. Locate the tables by the color-coded tabs, which match corresponding blocks in diagram at right. In the instructions that follow, **Temperature** means dry-bulb temperature.

#### STEP

1. If there is RAIN, go to Step 2; if there is NO RAIN, go to Step 5.
2. Enter Table 1 with **Yesterday's FFMC** and **Rain**. Record **FFMC Rain Code**.
3. Enter Table 3 with **Yesterday's DMC** and **Rain**. Record **DMC Rain Code**.
4. Enter Table 5 with **Yesterday's DC** and **Rain**. Record **DC Rain Code**.
5. Note **Temperature** and enter appropriate section (A-H) of Table 2 with **Relative Humidity**, **Wind**, and **FFMC Rain Code** or **Yesterday's FFMC**. Record today's **FFMC**.
6. Enter Table 4 with **Temperature**, **Relative Humidity**, and **Month**. Record **Drying Factor** and add to **DMC Rain Code** or to yesterday's **DMC**. This is today's **DMC**.
7. Enter Table 6 with **Temperature** and **Month**. Record **Drying Factor** and add to **DC Rain Code** or to yesterday's **DC**. This is today's **DC**.
8. Enter Table 7 with **Wind** and **FFMC**. Record **ISI**.
9. Enter Table 8 with **DMC** and **DC**. Record **BUI**.
10. Enter Table 9 with **ISI** and **BUI**. Record **FWI**.

## ANEXO B – FLUXOGRAMA DE USO DAS TABELAS DOS SERVIÇOS FLORESTAIS CANADIANOS

Schematic diagram for calculating the six standard components of the Canadian Forest Fire Weather Index System

