

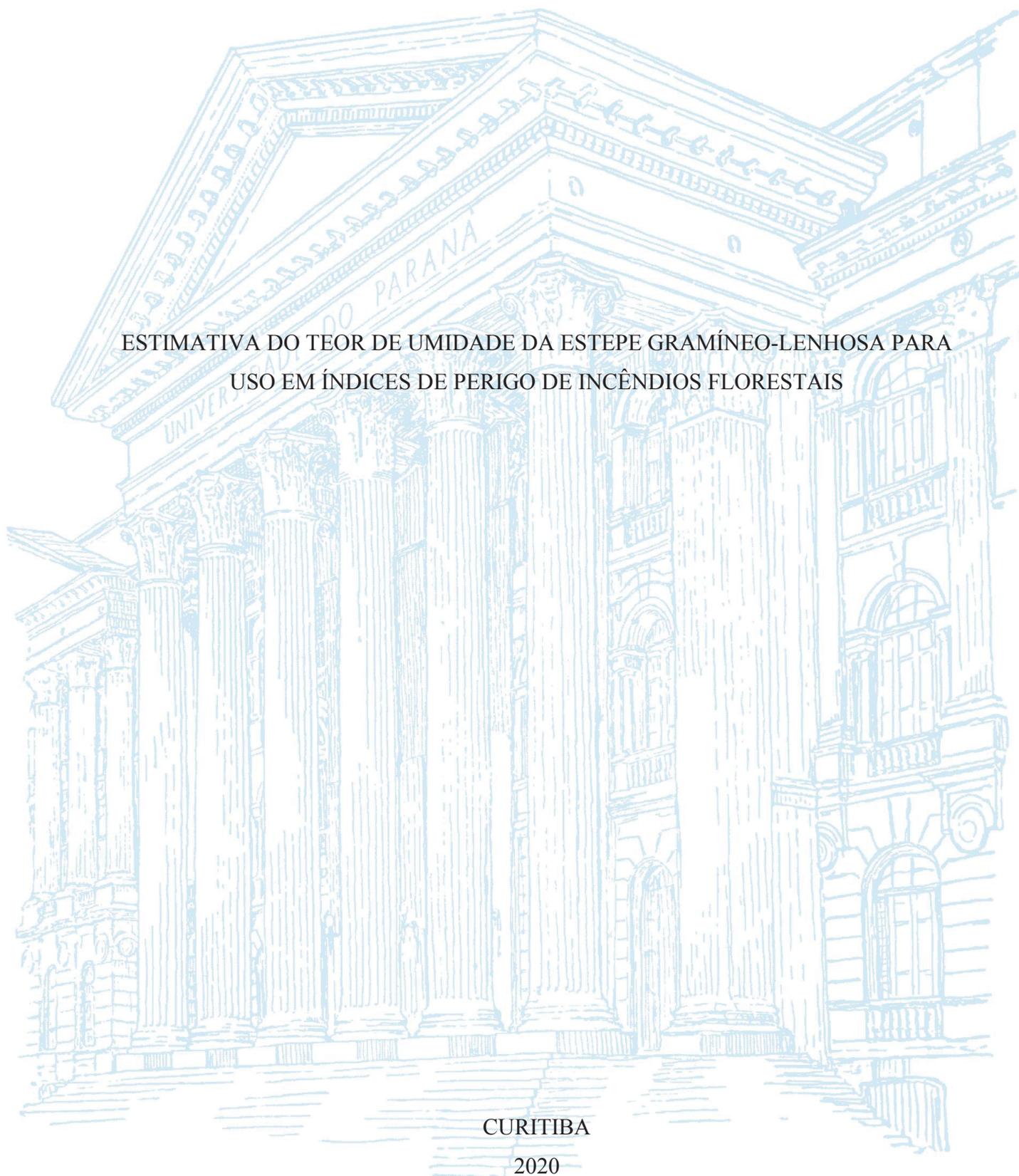
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JOÃO FRANCISCO LABRES DOS SANTOS

ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE DA ESTEPE GRAMÍNEO-LENHOSA PARA  
USO EM ÍNDICES DE PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS

CURITIBA

2020



JOÃO FRANCISCO LABRES DOS SANTOS

ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE DA ESTEPE GRAMÍNEO-LENHOSA PARA  
USO EM ÍNDICES DE PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, do Setor de Ciências Agrárias, da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Batista.  
Coorientador: Prof. Dr. Alexandre França Tetto.

CURITIBA

2020

Ficha catalográfica elaborada pela  
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Santos, João Francisco Labres dos

Estimativa do teor de umidade da estepe gramíneo-lenhosa para uso em índices de perigo de incêndios florestais / João Francisco Labres dos Santos. - Curitiba, 2020.

75 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Antonio Carlos Batista

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre França Tetto

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 28/02/2020.

Área de concentração: Conservação da Natureza.

1. Incêndios florestais - Previsão. 2. Umidade. 3. Plantas - Efeito da umidade. 4. Gramínea. 5. Teses. I. Batista, Antonio Carlos. II. Tetto, Alexandre França. III. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDD – 634.9

CDU – 634.0.43



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA  
FLORESTAL - 40001016015P0

## TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **JOÃO FRANCISCO LABRES DOS SANTOS** intitulada: **ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE DA ESTEPE GRAMÍNEO-LENHOSA PARA USO EM ÍNDICES DE PERIGO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS**, sob orientação do Prof. Dr. ANTONIO CARLOS BATISTA, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 28 de Fevereiro de 2020.

ANTONIO CARLOS BATISTA

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

EDUARDO HENRIQUE REZENDE

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DE TOCANTINS)

RONALDO VIANA SOARES

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

*Aos meus avós Ana e João  
(In memoriam) e  
às pessoas que amo*  
**DEDICO.**

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Márcia e Edson, pelo que sou e o suporte irrestrito ao longo dessa caminhada. À minha avó Dina e minha irmã Ana pelo apoio de sempre.

À minha amada Maria Clarissa, minha fonte de inspiração em tudo que faço, pelo amor, carinho, companheirismo, paciência e incentivo. Te amo!

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Antonio Carlos Batista, por ter “comprado a briga” e pelos ensinamentos que me permitiram desenvolver esse trabalho. Com certeza carregarei comigo para sempre.

Ao meu coorientador Prof. Dr. Alexandre França Tetto pelo auxílio e contribuição desde os tempos de monitoria e voluntariado no laboratório.

Aos meus colegas de laboratório, em especial meus amigos Igor Kiyoshi Takashina, Bruna Kovalsyki e Tiago de Sousa Ferreira, pela ajuda e amizade em todos os momentos.

Gostaria de agradecer a todos os amigos, da Pós e da Graduação, pelos momentos de descontração, conversa e parceria. Especialmente, meu amigo e colega de pesquisa Samuel Alves da Silva, pelos conselhos no “cafezinho do Manejo”.

Aos colegas André Nascimento e Sandey Basso pelo empenho no desenvolvimento da câmara climática, sem o trabalho de vocês esse estudo não seria concluído.

Ao Prof. Dr. Ricardo Klitzke pela disponibilização do Laboratório de Secagem para os testes preliminares.

Ao Prof. Dr. Sebastião do Amaral Machado, pelas conversas animadas e conselhos na reta final.

Ao Instituto Ambiental do Paraná, na pessoa do Juarez, gestor do Parque Estadual de Vila Velha, que possibilitou a instalação dos experimentos.

À Universidade Federal do Paraná e ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

A todos, meu muito obrigado.

*“Apoderei-me do fogo, em sua fonte  
primitiva; ocultei-o no cabo de uma fôrula, e  
ele tornou-se para os homens a fonte de todas  
as artes e um recurso fecundo... Desse mestre  
aprenderão muitas ciências...”*  
*(Ésquilo – Prometeu acorrentado)*

## RESUMO

Um dos fatores que influencia a inflamabilidade e o comportamento do fogo é o teor de umidade do material combustível. O Código Horário de Umidade do Combustível Fino (HFFMC) e o Código de Umidade do Combustível Herbáceo (GFMC) possuem em suas estruturas componentes para a estimativa do teor de umidade horária do material combustível por meio de variáveis meteorológicas, bem como a probabilidade de ocorrência de incêndio e são sub-índices do Fire Weather Index (FWI), índice de perigo de incêndios florestais canadense. Para o manejo correto do fogo, se faz necessária a utilização de um índice de perigo eficiente. Portanto, o objetivo desse trabalho é ajustar os modelos de estimativa do teor de umidade para a estepe gramíneo-lenhosa do Parque Estadual de Vila Velha (PEVV), bem como avaliar a eficiência do GFMC adaptado à realidade do PEVV. As coletas para a determinação do teor de umidade horário foram realizadas durante o inverno de 2018, no período das 8:30 às 17:30h e divididas em duas campanhas de cinco dias com condições meteorológicas estáveis no período de 10/07/2018 a 14/08/2018 e a segunda de 04/09/2018 a 08/09/2018. Para a obtenção dos valores de umidade de equilíbrio e do *timelag* foram confeccionadas amostras para teste em câmara climática. Os modelos ajustados para umidade de equilíbrio e do *timelag* foram avaliados por meio da análise da distribuição dos resíduos, do erro absoluto médio (EAM), da raiz do erro quadrático médio (REQM) e do coeficiente de determinação ( $R^2$ ). O teor de umidade estimado foi validado a partir dos dados obtidos nas coletas horárias das campanhas e os modelos foram avaliados por meio do  $R^2$  e EAM. Para a avaliação da eficiência dos índices, o perfil de ocorrência de incêndios de 2007 a 2016 foi analisado e a estação de incêndios foi determinada por meio de uma análise de conglomerados. A Fórmula de Monte Alegre (FMA) foi calculada e ajustada para comparação. O GFMC ajustado e o FMA foram submetidos a uma análise da curva característica do receptor (COR) e seu ponto de corte ótimo determinado pelo índice de união (IU). O desempenho do GFMC ajustado e da FMA foi testado utilizando uma tabela de contingência para a obtenção dos valores de *skill score*, porcentagem de sucesso (PS), probabilidade de detecção (POD) e probabilidade de falsa detecção (POFD). Constatou-se que tanto as curvas de adsorção como as de dessorção apresentaram um comportamento exponencial. Os modelos exponenciais para a estimativa do *timelag* apresentaram valores de  $R^2$  de 83,0% para dessorção e 86,9% para adsorção. Os valores de EAM obtidos foram de 9% para dessorção e 8,2% para adsorção. O REQM foi de 12,5% para dessorção e 11,4% para adsorção. Os modelos de umidade de equilíbrio apresentaram um  $R^2$  para o modelo de dessorção foi 99,87% e para o de adsorção 99,71%. O EAM obtido para a curva de adsorção foi de 0,29% e de 0,16% para dessorção. Os valores de REQM para adsorção e dessorção foram 0,288 e 0,506, respectivamente. O modelo do GFMC ajustado apresentou um  $R^2$  de 93,1% e um EAM de 3,42% para estimar o teor de umidade horário. A análise COR mostrou que as escalas do GFMC e do FMA apresentaram precisão muito boa na estimativa do perigo na estação seca. Os dois índices ajustados apresentaram distribuição decrescente no número de dias por classe e crescente no número de ocorrências por classe. A metodologia do índice de união (IU) mostrou-se eficiente na determinação de um ponto ótimo. O GFMC apresentou eficiência superior ao FMA após o ajuste dos modelos para a estimativa do teor de umidade e após o ajuste de classes de perigo, apresentando um *skill score* de 0,82, um PS de 92,5%, uma POD de 81,6% e uma POFD de 2,1. Recomenda-se o uso do GFMC ajustado para a região estudada.

Palavras-chave: teor de umidade; umidade de equilíbrio; *timelag*; *Grass Fuel Moisture Code*.

## ABSTRACT

One of the influent factors about the flammability and fire behavior is the moisture content of the fuel. The Hourly Fine Fuel Moisture Code (HFFMC) and the Grass Fuel Moisture Code (GFMC) are indices that compose the Fire Weather Index (FWI), the Canadian forest fire hazard index. They have in their structures components for estimating the hourly moisture content of the fuel using meteorological variables and providing the probability of fire occurrence. For the wise management of fire, it is necessary to use an efficient danger index. Therefore, the objective of this work is to fit the models to estimate the moisture content for the grassy-woody steppe of the State Park of Vila Velha (SPVV) and evaluate the efficiency of the GFMC fitted to the reality of the SPVV. The data to determine the hourly moisture content were performed during the winter of 2018, from 8:30 am to 5:30 pm and divided into two campaigns of five days with noon weather conditions in the period from 07/10/2018 and 08/14/2018 and the second from 09/04/2018 to 09/08/2018. To obtain the values of the equilibrium moisture content and the timelag, destructive samples are taken out to perform sorption tests on climatic chamber. The fitted equilibrium moisture content models were applied by analyzing the residual distribution, the mean absolute error (MAE), the root of the mean square error (REQM) and the determination coefficient ( $R^2$ ). The estimated moisture content was validated from the data obtained from hourly collections and the models were evaluated using  $R^2$  and MAE. To evaluate the efficiency of the index, an analysis of the fire occurrence profile from 2007 to 2016 was collected and the fire season was determined by the cluster analysis. The Monte Alegre Formula (FMA) was calculated and fitted for comparison. The scale of fitted GFMC and the FMA were submitted to an analysis of the receiver operating characteristic curve (ROC) and its optimal threshold point was determined by the union index (UI). The performance of the fitted GFMC and the FMA was tested using a contingency table to obtain the values of skill score, success rate (PS), probability of detection (POD) and probability of false detection (POFD). It was found that both the adsorption and desorption curves showed an exponential behavior. The exponential models for estimating the timelag showed  $R^2$  values of 83.0% to desorption and 86.9% to adsorption. The MAE values obtained were 9% to desorption and 8.2% to adsorption. REQM was 12.5% to desorption and 11.4% to adsorption. The equilibrium moisture content models showed an  $R^2$  to the desorption model of 99.87% and 99.71% to the adsorption model. The MAE obtained for the adsorption curve was 0.29% and 0.16% to desorption. The REQM values for adsorption and desorption were 0.288 and 0.506, respectively. The fitted GFMC model had an  $R^2$  of 93.1% and a MAE of 3.42% to estimate the hourly moisture content. 3,835 days were analyzed, with 901 days with the fire occurrences. The ROC analysis showed that the GFMC and FMA scale have a very good accuracy to estimate the fire danger in the dry season. The two fitted indices showed a decreasing distribution in the number of days by class and an increasing distribution in the number of occurrences by class. The union index (UI) methodology proved to be efficient in determining an optimum point. The GFMC showed better efficiency than the FMA after fitting the models to estimate the moisture content and after fitting the danger classes, presenting a skill score value about 0.82, a PS of 92.5%, a POD of 81.6% and a POFD of 2.1. It is recommended to use the GFMC adjusted for the studied region.

Keywords: moisture content; equilibrium moisture content; timelag; Grass Fuel Moisture Code.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - TRIÂNGULOS DA COMBUSTÃO E COMPORTAMENTO DO FOGO .....	18
FIGURA 2 - ESTRUTURA DE UM SISTEMA DE ÍNDICES DE PERIGO.....	24
FIGURA 3 - LOCALIZAÇÃO DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA (PEVV) .....	27
FIGURA 4 - CLIMOGRAMA PARA A REGIÃO DO PEVV DE 1954 A 2001 .....	28
FIGURA 5 - VEGETAÇÃO DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA (A) E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE COLETA (B).....	29
FIGURA 6 - ESQUEMA DE ALOCAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM.....	30
FIGURA 7 - PROCEDIMENTO DE COLETA E SECAGEM DO MATERIAL COMBUSTÍVEL .....	31
FIGURA 8 - CÂMARA CLIMÁTICA UTILIZADA.....	32
FIGURA 9 - PREPARAÇÃO E SECAGEM DAS AMOSTRAS (A) E DISPOSIÇÃO DAS BALANÇAS NA CÂMARA CLIMÁTICA (B).....	33
FIGURA 10 - SEQUÊNCIA DE COLETA DO TEOR DE UMIDADE.....	38
FIGURA 11 - CURVAS DE ADSORÇÃO À TEMPERATURA DE 26,7 °C E UMIDADE RELATIVA DE 30 A 90%.....	45
FIGURA 12 - CURVAS DE DESSORÇÃO À TEMPERATURA DE 26,7 °C E UMIDADE RELATIVA DE 30 A 90%.....	46
FIGURA 13 - CURVAS DE DESSORÇÃO E ADSORÇÃO OBTIDAS PELOS MODELOS AJUSTADOS.....	48
FIGURA 14 - DADOS DE ADSORÇÃO E DESSORÇÃO PARA A ESTEPE DO PEVV...	51
FIGURA 15 - SÉRIE TEMPORAL DO TEOR DE UMIDADE OBSERVADO E ESTIMADOS PELO HFFMC, GFMC, E O MODELO AJUSTADO PARA JULHO (A) E SETEMBRO (B) .....	52
FIGURA 16 - VALORES ESTIMADOS X OBSERVADOS DO GFMC ORIGINAL (A) E DO MODELO AJUSTADO (B).....	53
FIGURA 17 - (A) DISTRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE OCORRÊNCIAS POR ANO, (B) DISTRIBUIÇÃO DA ÁREA QUEIMADA POR ANO E (C) MÉDIA DA ÁREA QUEIMADA POR INCÊNDIO POR ANO PARA O MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA .....	55
FIGURA 18 - DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA POR MÊS E PORCENTAGEM DE OCORRÊNCIAS DE INCÊNDIOS .....	56

FIGURA 19 - DENDROGRAMA RELACIONANDO DIAS COM CHUVA E NÚMERO DE OCORRÊNCIAS DE INCÊNDIOS .....	57
FIGURA 20 - CURVA DE CARACTERÍSTICA DO RECEPTOR E ÁREA SOB A CURVA PARA GFMC AJUSTADO PARA ESTAÇÃO ÚMIDA (A); FMA PARA ESTAÇÃO ÚMIDA (B); GFMC AJUSTADO ESTAÇÃO SECA (C); FMA PARA ESTAÇÃO SECA (D).....	58
FIGURA 21 - NÚMERO DE DIAS PREVISTOS E DIAS DE OCORRÊNCIAS DE INCÊNDIOS POR CLASSE DE PERIGO: GFMC ADAPTADO (A) E (C) E FMA (B) E (D).....	59
FIGURA 22 - NÚMERO DE DIAS PREVISTOS E DIAS DE OCORRÊNCIAS POR CLASSE DE PERIGO AJUSTADAS PARA O GFMC ADAPTADO (A) E (C) E FMA (B) E (D).....	63

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - PROPRIEDADES DO HOURLY FINE FUEL MOISTURE CODE.....	35
TABELA 2 - PROPRIEDADES DO GRASS FUEL MOISTURE CODE 37	
TABELA 3 - RESTRIÇÕES A SOMATÓRIA DA FMA, DE ACORDO COM A PRECIPITAÇÃO DO DIA .....	40
TABELA 4 - ESCALA DE PERIGO DO GFMC E DA FMA.....	40
TABELA 5 - TABELA DE CONTINGÊNCIA UTILIZADA .....	41
TABELA 6 - TIPOS E CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL FINO.....	43
TABELA 7 - TEMPOS DE RESPOSTA E DESVIO PADRÃO PARA A TEMPERATURA DE 26,7 °C .....	47
TABELA 8 - MODELOS EXPONENCIAIS DE SORÇÃO E PARÂMETROS ESTATÍSTICOS .....	48
TABELA 9 - VALORES MÉDIOS DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO .....	50
TABELA 10 - VARIÁVEIS DE EFICIÊNCIA PARA A ESCALA ORIGINAL .....	61
TABELA 11 - NOVOS LIMITES DE CLASSE OBTIDOS PARA O GFMC ADAPTADO E PARA A FMA .....	62
TABELA 12 - VARIÁVEIS DE DESEMPENHO PARA OS ÍNDICES AJUSTADOS.....	64

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>15</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	15
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>16</b>
3.1 INCÊNDIOS FLORESTAIS .....	16
3.2 FATORES QUE CONTRIBUEM PARA O PERIGO DE INCÊNDIOS .....	17
3.2.1 Condições meteorológicas.....	18
3.2.2 Material combustível .....	19
3.2.3 Teor de umidade do material combustível .....	21
3.3 ÍNDICES DE PERIGO.....	23
3.3.1 Fórmula de Monte Alegre.....	24
3.3.2 <i>Fire Weather Index</i> .....	25
3.3.3 Código de Umidade do Combustível Fino .....	26
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO .....	27
4.2 MODELAGEM PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE.....	30
4.2.1 Caracterização do material combustível.....	30
4.2.2 Obtenção dos dados de umidade de equilíbrio .....	32
4.2.3 Determinação do Código Horário de Umidade do Combustível Fino (HFFMC) .....	34
4.2.4 Determinação do Código de Umidade do Combustível Herbáceo (GFMC).....	36
4.3 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS .....	38
4.3.1 Teor de umidade .....	38
4.3.2 Análise da eficiência dos índices.....	39
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>43</b>
5.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL COMBUSTÍVEL.....	43
5.2 TEOR DE UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL.....	44
5.2.1 Umidade de equilíbrio .....	44
5.2.2 Teor de umidade .....	52
5.3 EFICIÊNCIA DOS ÍNDICES .....	54
5.3.1 Análise do perfil de incêndios .....	54
5.3.2 Análise da eficiência dos índices.....	58

<b>6 CONCLUSÕES.....</b>	<b>66</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>67</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O fogo é um importante agente de transformação dos ecossistemas e ocorre de forma natural ou provocado por ações humanas. O regime alterado do fogo torna-se uma ameaça devido aos potenciais danos ambientais, econômicos e sociais. Entretanto, o fogo pode ser um fator biológico importante e benéfico para os biomas que são adaptados à sua ocorrência.

A reação da combustão completa de um material vegetal envolve três elementos básicos: calor, oxigênio e combustível. Dentre os três, aquele que apresenta maior possibilidade de manejo preventivo é o combustível. O material combustível florestal pode ser caracterizado como qualquer material orgânico, vivo ou morto capaz de entrar em ignição e queimar. A categoria responsável pela ignição compreende aos materiais mortos e finos.

O teor de umidade dos combustíveis finos é um dos fatores determinantes no comportamento do fogo, influenciando variáveis como a propagação e a intensidade da chama, e, principalmente a inflamabilidade, que corresponde à capacidade do material combustível entrar em ignição. Os fatores intrínsecos ao material combustível e as condições meteorológicas influenciam na quantidade de umidade presente no material combustível, esta regula o início e a propagação do fogo, sendo então, a estimativa do teor de umidade uma importante alternativa para avaliação do perigo de incêndios florestais.

O método tradicional para a determinação do teor de umidade do material combustível consiste na medição direta por amostragem em campo. Embora seja o método mais preciso, torna-se inviável logisticamente quando se pretende realizar medições diárias para a determinação do grau de perigo de incêndios. Alguns índices de ocorrência/comportamento do fogo possuem em sua estrutura componentes responsáveis pela estimativa do perigo de incêndios por meio da previsão do teor de umidade do material combustível fino, nos quais se destacam o *Dead Fuel Moisture Content*, componente do *National Fire Danger Rating System* (NFDRS) dos Estados Unidos e o Código de Umidade do Combustível Fino (*Fine Fuel Moisture Code - FFMC*), sub-índice do *Fire Weather Index* (FWI) do Canadá, ambos com bom desempenho na predição de perigo, fornecendo informações precisas para planos de prevenção e manejo do fogo em seus locais de origem.

O FWI, mais precisamente o FFMC, possui vantagem sobre outros índices por ser desenvolvido com base em 50 anos de experimentos e ser amplamente utilizado no mundo com resultados satisfatórios. Construído originalmente para florestas de coníferas do Canadá, caracteriza-se por permitir calibração para outros tipos de materiais combustíveis e utilização de outros modelos de predição do teor de umidade em sua estrutura.

A estepe gramíneo-lenhosa, conhecida também como campos gerais ou campos sulinos, está inserida no contexto dos biomas mata atlântica e pampa. É um ecossistema dependente do fogo para conservação de suas espécies e paisagem e possui histórico de utilização econômica como pastagens, com o uso do fogo para sua renovação.

O Parque Estadual de Vila Velha (PEVV), situado no Segundo Planalto Paranaense, é uma unidade de conservação de proteção integral e tem como objetivo principal a manutenção dos remanescentes de estepe gramíneo-lenhosa e apresenta um programa de manejo da vegetação por meio de queimas prescritas visando a conservação e recuperação dessa tipologia. Assim, é fundamental a obtenção de informações precisas sobre o teor de umidade do material combustível e a utilização de um índice de perigo eficiente a fim de auxiliar a alocação de recursos para o planejamento de queimas controladas e combate aos incêndios florestais.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Ajustar modelos de estimativa do teor de umidade para a estepe gramíneo-lenhosa do PEVV a partir do índice canadense Código de Umidade do Combustível Herbáceo (*Grass Fuel Moisture Code* - GFMC) e testar sua eficiência na predição do perigo de incêndios, comparando com a Fórmula de Monte Alegre (FMA) por meio de análise do perfil histórico de ocorrências e novas ferramentas de avaliação do desempenho de índices.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Ajustar modelos para estimativa da umidade de equilíbrio com dados obtidos em câmara climática;
- b) Ajustar os modelos para a estimativa de teor de umidade do material combustível e validar as previsões fornecidas com dados obtidos em campo;
- c) Comparar a eficiência o GFMC adaptado para o PEVV com a Fórmula de Monte Alegre (FMA);

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 INCÊNDIOS FLORESTAIS

Soares (1985) define incêndio florestal como um fogo incontrolado que se propaga livremente e consome os diversos tipos de material combustível existente na floresta. Esse termo específico é utilizado de forma geral no Brasil, servindo para definir incêndios que atingem também outros tipos de vegetação que não possuem porte florestal.

A ocorrência de incêndios naturais ao longo da história da vida terrestre, de forma concomitante com o processo de domesticação do fogo, convida a conjecturar que, possivelmente, essa interação gerou efeitos evolutivos pronunciados nos ecossistemas (BOWMAN *et al.*, 2009 e 2011). Potencialmente, todos os ecossistemas da Terra possuem um regime de fogo, um histórico que, de alguma forma, afetou a estrutura e a composição das espécies, sendo o fogo um agente biológico que mantém a viabilidade, estrutura e funcionamento equilibrado destes (MYERS, 2006).

Hardesty, Myers e Fulks (2005) e Myers (2006) classificam os ecossistemas, em relação ao fogo, em quatro categorias: sensíveis ao fogo, independentes e dependentes do fogo e inclui ainda os influenciados pelo fogo. Os ecossistemas dependentes são aqueles que desenvolveram adaptações ao fogo, tornando-se resistentes e são beneficiados pela ação do mesmo, dentre os quais estão o cerrado e os campos sulinos. A presença do fogo nesses locais é necessária para a conservação das espécies nativas, os habitats dos animais e a paisagem.

Eliminar ou elevar as ocorrências de incêndios, assim como alterar ou restringir elementos como frequência, comportamento e padrão de propagação do fogo pode resultar em transformações que afetam de maneira negativa a viabilidade dos ecossistemas dependentes do fogo (MYERS, 2006). De acordo com Fidelis e Pivello (2011), a exclusão do fogo em áreas de campo ocasiona um aumento no estrato lenhoso e consequente perda de espécies herbáceas. No caso dos Campos Gerais, por exemplo, a floresta com araucárias tende a avançar sobre a vegetação campestre devido à exclusão do fogo.

A influência humana no regime do fogo ocorre em várias vias e as motivações para o uso do mesmo variam consideravelmente desde o gerenciamento hábil de recursos naturais (agricultura, pecuária, silvicultura e gestão da vida selvagem) à proteção de infraestrutura e áreas urbanas (BOWMAN *et al.*, 2011).

De acordo com Santos, Soares e Batista (2006), as principais causas de ocorrências dos incêndios florestais no Brasil são classificadas nos grupos de “incendiários” e “queimas para limpeza”. Segundo Pivello (2011), em 2009, a estação seca na região central do Brasil, caracterizada pela presença do bioma cerrado, foi muito curta, resultando num acúmulo de biomassa ao longo do ano. No ano seguinte, houve um período prolongado de seca culminando com o aumento do número de incêndios. França (2010) constatou que muitos desses focos queimaram mais de 50% da área dos parques nacionais de Emas (91%), Chapada dos Veadeiros (77%) e do Araguaia (56%). No período de 2005 a 2014, segundo Machado *et al.* (2017), os incêndios queimaram 23.737, 76 ha do Parque Nacional Chapada dos Guimarães, o que corresponde a 72,75% da área total.

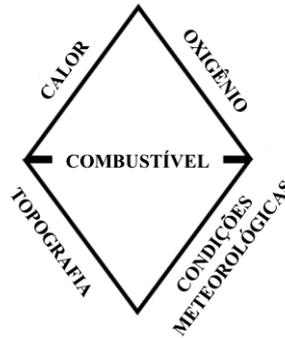
Conforme Batista, Oliveira e Soares (2002), o estado do Paraná apresenta em determinada época do ano, condições favoráveis para a ocorrência de incêndios florestais, devido aos fatores climáticos e aos tipos de vegetação existentes. Observaram também uma ocorrência mais intensa de incêndios em anos de invernos mais secos, de forma cíclica, a cada três a cinco anos, de acordo com os dados meteorológicos disponíveis. Tetto, Batista e Soares (2012), em pesquisa realizada entre 2005 e 2010, confirmam esse resultado e encontraram 54.793 ocorrências de incêndios que queimaram 172.130 ha, sendo que 52,5% das ocorrências foram registradas nos meses de junho a setembro.

### 3.2 FATORES QUE CONTRIBUEM PARA O PERIGO DE INCÊNDIOS

A ocorrência e propagação dos incêndios florestais dependem de fatores que variam em função das características do ambiente, influenciando de forma distinta o fenômeno da combustão (BATISTA, 2000). Segundo Soares (1985), a probabilidade do fogo ocorrer e se propagar é função da probabilidade de haver uma fonte de fogo e condições favoráveis para que isso ocorra.

Para Duane *et al.* (2015), existem dois triângulos conceituais que explicam o comportamento do fogo (FIGURA 1) (SOARES; BATISTA; TETTO, 2017).

FIGURA 1 - TRIÂNGULOS DA COMBUSTÃO E COMPORTAMENTO DO FOGO



Fonte: adaptado de Duane *et al.* (2015) e Soares, Batista e Tetto (2017).

Um dos triângulos é basicamente formado por três fatores: material combustível, condições meteorológicas e topografia. Esses fatores, quando somados à interação dos elementos básicos do triângulo do fogo (calor e oxigênio), influenciam a ignição, o crescimento, a propagação e o declínio de um incêndio florestal.

Os estudos dessas interações culminaram no desenvolvimento e uso de modelos matemáticos para a determinação do perigo de ocorrência de incêndios, a predição do comportamento e o efeito do fogo, que constitui um passo importante no manejo dos incêndios (WHITE; RIBEIRO; SOUZA, 2013).

### 3.2.1 Condições meteorológicas

De acordo com Batista (2000), elementos meteorológicos como temperatura, umidade relativa, vento e precipitação são fatores decisivos na ignição e na propagação dos incêndios. As condições meteorológicas determinam em grande parte como os incêndios se comportam, quando e onde ocorrem, sendo essas variáveis as mais indicadas para o estabelecimento de índices de perigo de incêndios florestais (VÉLEZ, 2009b).

Normalmente a estação de incêndios florestais está associada à época do ano em que a temperatura é maior e o período de seca é prolongado (FIMIA, 2009). Portanto, as condições meteorológicas, além de determinarem a duração da estação de incêndios, exercem influência sobre o desenvolvimento da vegetação e, por consequência, na quantidade e arranjo do material combustível (HEIKKILÄ; GRÖNQVST; JURVÉLIUS, 2007).

A temperatura do ar exerce influência direta na quantidade de calor necessária para elevar o combustível à temperatura de ignição, isto é, sua inflamabilidade (SOARES; BATISTA; TETTO, 2017). Também possui efeito indireto sobre outros fatores como velocidade do vento, umidade relativa e umidade do combustível (SCHROEDER; BUCK, 1970).

Outro fator de influência importante é o vento. Atrelado às condições de estabilidade atmosférica, é o fator menos previsível e acelera o processo de secagem do material combustível, principalmente a primeira fase, retirando a umidade presente no ar e nos combustíveis florestais. Influencia também no comportamento do fogo, carregando fagulhas e iniciando novos incêndios ou aumentando a disponibilidade de oxigênio para combustão, além de direcionar e determinar a forma de propagação (SCHROEDER; BUCK, 1970; SOARES; BATISTA; TETTO, 2017). Seger *et al.* (2013), em estudo de queimas controladas para estepe gramíneo-leñosa no Paraná, constataram que a velocidade de propagação do fogo é significativamente maior em queimas realizadas a favor do vento.

A umidade relativa é um indicador em porcentagem da saturação do ar a determinada temperatura e afeta diretamente o conteúdo de umidade do material combustível. Devido as propriedades higroscópicas do material combustível, existe uma troca contínua de vapor d'água com o ambiente, desde que não haja influência da precipitação. Esse processo de ganho ou perda de água é regido pela umidade relativa do ar (HEIKKILÄ; GRÖNQVST; JURVÉLIUS, 2007; SOARES; BATISTA; TETTO, 2017; SCHROEDER; BUCK, 1970). Segundo White, Ribeiro e Souza (2013), a intensidade de um incêndio também está ligada às condições de umidade relativa, tornando-se uma variável de entrada importante para modelos de comportamento do fogo como BehavePlus (ANDREWS, 2014), FARSITE (FINNEY, 2004) e Prometheus (TYMSTRA *et al.*, 2010).

Segundo Schroeder e Buck (1970), a quantidade de precipitação e sua distribuição ao longo do ano são fatores decisivos no controle e duração das temporadas de incêndios. Apesar de ser um fator limitante para ocorrência de incêndios, sua influência evidente sobre o fogo acaba por subestimar seu efeito (SOARES; BATISTA; TETTO, 2017). Tetto, Batista e Soares (2012), ao analisarem a ocorrência de incêndios florestais de 2005 a 2010 para o estado do Paraná, constataram uma correlação negativa entre o número de ocorrências e a precipitação ( $r = -0,77$ ). Outro estudo, realizado para os incêndios ocorridos na região de Telêmaco Borba, comprovou que o maior número de ocorrências de incêndio coincide justamente com o período de menor precipitação (TETTO *et al.*, 2015).

### 3.2.2 Material combustível

Segundo Soares, Batista e Tetto (2017), qualquer material orgânico, vivo ou morto, incorporado, sobre ou acima do solo, capaz de entrar em ignição e queimar pode ser tratado como combustível florestal. Suas características físicas e químicas determinam a possibilidade

de ignição, sendo o ponto essencial para a proteção contra incêndios e o único com possibilidade de atuação preventiva direta (LARA, 2009).

Os combustíveis florestais podem ser classificados conforme sua localização no estrato arbóreo como: aéreos, superficiais e subterrâneos (BROWN; DAVIS, 1973). Heikkilä, Grönqvist e Jurvélius (2007) acrescentam que o combustível florestal pode ser caracterizado conforme sua classe de tamanho (combustíveis finos e grossos); arranjo do material (organização do combustível nos planos horizontal e vertical); massa (quantidade de material disponível para queima); tipo de combustível (gramíneas, acículas, arbustos ou troncos) e teor de umidade.

A quantidade de material combustível define se o fogo vai ou não se propagar, seu comportamento e a intensidade de calor liberada pelo processo de combustão (SOARES; BATISTA; TETTO, 2017). O arranjo e a continuidade desse material são fatores determinantes para a quantidade de oxigênio disponível para queima (BYRAM, 1959). Esses dois fatores quando alterados de forma equivocada e somados às estações severas de fogo, aumentam a extensão, a severidade e a frequência dos incêndios florestais (MILLER *et al.*, 2009; WESTERLING, 2016).

### 3.2.2.1 Gramíneas

Dentre os combustíveis considerados finos, as gramíneas compõem uma classe de combustíveis importante devido a sua presença em vários locais do planeta, mas principalmente, pela sua continuidade e completa exposição ao sol (BROWN; DAVIS, 1973). Além dessas características, Cheney e Sullivan (2008) destacam que as gramíneas secam de forma mais rápida do que outros combustíveis logo após a ocorrência de chuva.

Dos tipos de vegetação que ocorrem no território brasileiro, aquele que possui um estrato herbáceo proeminente é o cerrado, denominado savana pelo Instituto Brasileiro De Geografia e Estatística (IBGE) (MORO, 2012). Esse termo foi criado por Fernández de Oviedo y Valdés (1851 – 1955) para denominar os *lhanos arbolados* da Venezuela, sendo posteriormente introduzido na África por pesquisadores espanhóis como *savannah* (VELOSO; RANGEL FILHO; LIMA, 1991). Sua estrutura apresenta árvores de porte médio ou baixo, inseridas de forma espaçada em uma sinúsia herbácea praticamente contínua (IBGE, 2012). Ocupando originalmente 1.900.000 km<sup>2</sup> do território brasileiro, a savana é o segundo maior bioma brasileiro e sua ocorrência domina os planaltos do Brasil Central, nos estados de Minas Gerais, Mato Grosso do Sul, Mato Grosso, Goiás, Tocantins e Bahia, com áreas expressivas em Rondônia, Piauí e São Paulo e em disjunções pontuais no estado do Paraná (IBGE, 2004 e 2012).

Outra formação de constituição herbácea semelhante que compõe um elemento característico dos planaltos do sul do Brasil é a estepe. Esse termo, adotado pelo IBGE, é originário da Rússia (*Cmenne*) e utilizado internacionalmente para designar formações vegetais predominantemente campestres da zona temperada condicionadas a um período de seca (IBGE, 2012). A estepe possui paisagem majoritariamente campestre, interrompida por agrupamentos florestais nas margens de rios ou isoladas sobre o campo (RODERJAN *et al.*, 2002). Aproximadamente 19.000 km<sup>2</sup> do estado do Paraná estão inseridos nesse contexto, constituindo uma unidade fitogeográfica chamada de Campos Gerais (MAACK, 2012).

Os Campos Gerais, que abrangem 25 municípios do estado do Paraná e cuja maior extensão está no Planalto de Ponta Grossa (Segundo Planalto Paranaense), formam uma faixa que atravessa o estado de norte a sul (MELO *et al.*, 2007). De acordo com Silva (2011), os Campos Gerais não fazem parte do cerrado, porém parte significativa de sua composição florística descende ou ocorre com tipicidade na área de cerrado. Contudo, Moro (2012) afirma que os relictos de cerrado presentes nos Campos Gerais, cerca de 0,24% da região, podem ser considerados pontos limítrofes das áreas *core* do bioma cerrado. Indivíduos do bioma mata atlântica também fazem parte da composição devido às variações nas condições climáticas ao longo do tempo.

De acordo com Moro (2012), mesmo que o clima tenha se estabilizado em patamares mais quentes e úmidos, favorecendo as florestas, a presença do fogo de causa antrópica ajudou na manutenção dos Campos Gerais. Afirmção que corrobora com o fato de que o fogo garante a presença de sinúsias graminóides em detrimento das arbóreas, tanto nas estepes do sul, bem como no cerrado do Brasil central (RODERJAN *et al.*, 2002). Essa interação com o fogo torna os Campos Gerais um ecossistema dependente do fogo (MYERS, 2006).

### 3.2.3 Teor de umidade do material combustível

O teor de umidade do material combustível florestal é a quantidade de água presente na biomassa vegetal (WHITE, 2018). O conteúdo de umidade do material morto varia bastante, respondendo passivamente às variações meteorológicas e raramente atinge valores menores do que 2%, e podendo atingir 300% em relação à sua massa seca, após ocorrência de precipitação. O teor de umidade presente na vegetação viva possui menor variação, pois além da interação com o ambiente, possui processos fisiológicos que controlam a umidade do vegetal (SOARES; BATISTA; TETTO, 2017; PYNE, 1984).

Para Fuller (1991), é a umidade dos combustíveis mortos e finos que regula a capacidade de ignição e sustentação dos incêndios. A troca de umidade feita pelos combustíveis mortos ocorre de duas maneiras: a primeira depende do estado em que se encontra a água, por exemplo, após a ocorrência de precipitação, o combustível entra em contato direto com a água em estado líquido absorvendo-a através dos poros existentes do material vegetal; a segunda está ligada às propriedades higroscópicas das células vegetais e depende da diferença de vapor de água da atmosfera e o vapor de água presente no interior da partícula do combustível: se o vapor interno da partícula de combustível é maior que o presente na atmosfera, o combustível perde umidade, o ganho ocorre quando o vapor interno do combustível é menor que o atmosférico. Os processos de ganho e perda de umidade para o ambiente são chamados de adsorção e desorção, respectivamente, e o que regula a capacidade de realização dessas trocas é o tamanho do combustível (SCHROEDER; BUCK, 1970; PYNE, 1984; FULLER, 1991; SIMARD, 1968a).

Segundo Van Wagner (1972), o material combustível morto, se deixado por tempo indeterminado sob condições atmosféricas constantes, tende a alcançar um teor de umidade próximo ao equilíbrio. A umidade de equilíbrio (EMC) existe quando as pressões de vapor de água externa e interna da partícula de combustível são iguais. Como as condições atmosféricas na natureza geralmente variam consideravelmente na escala de horas, somente materiais de secagem rápida podem ocasionalmente aproximar-se do verdadeiro equilíbrio (PYNE, 1984; VAN WAGNER, 1972).

Byram (1963) explicou que os processos de adsorção e desorção do material combustível ocorrem a uma taxa exponencial, descrita em termos de uma constante chamada *timelag* (tempo de resposta), apresentada na equação a seguir:

$$\frac{m - m_i}{m_e - m_i} = 1 - e^{-kt}$$

sendo:

$m$  = teor de umidade em % no momento do registro;

$m_i$  = teor de umidade em % no início do teste;

$m_e$  = teor de umidade de equilíbrio;

$e$  = base dos logaritmos naturais (2,718282);

$t$  = tempo em horas;

$k$  = *timelag*.

De acordo com esse princípio, um material combustível qualquer, exposto a condições atmosféricas constantes, demora um certo período até que seu teor de umidade alcance o equilíbrio com o ambiente. Contudo, o principal resultado encontrado por Byram mostra que tempo de adsorção e dessorção, dos combustíveis florestais mortos, varia conforme seu tipo e tamanho. Material fino, como folhas, acículas e pequenos ramos podem alcançar a umidade de equilíbrio mais rapidamente do que materiais de dimensões maiores. Isso permitiu a classificação dos combustíveis conforme sua taxa de secagem (SCHROEDER; BUCK, 1970; SOARES; BATISTA; TETTO, 2017; BYRAM, 1963). Com isso, as curvas de adsorção e dessorção do material combustível resultam da combinação de várias equações exponenciais (chamado de modelo exponencial combinado) (BYRAM, 1963). Erbay e Icier (2010) afirmam que a adição de constantes às equações exponenciais proporciona um melhor ajuste na determinação do *time-lag*. Lopes *et al.* (2014) obtiveram bons resultados na utilização dessa metodologia no estudo da umidade de equilíbrio para acículas de *Pinus pinaster* Aiton em Portugal.

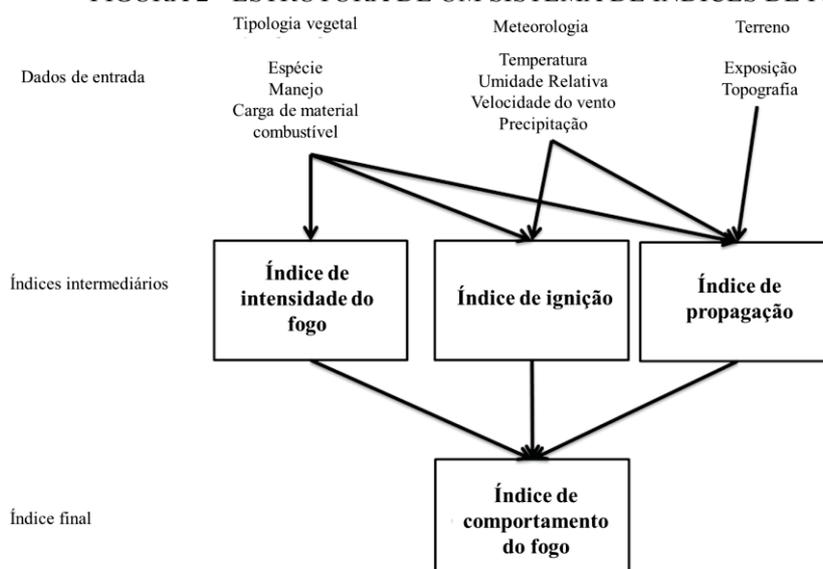
### 3.3 ÍNDICES DE PERIGO

Segundo Brown e Davis (1973), há uma diferença conceitual entre risco e perigo de incêndio. O risco de incêndios (*fire risk*) está relacionado com a probabilidade de um incêndio iniciar em função dos agentes causadores, enquanto o perigo de incêndios (*fire hazard*) está relacionado com características do material combustível (tipo, quantidade, umidade, arranjo e continuidade) que representam dificuldade para a extinção dos incêndios.

Para Soares, Batista e Tetto (2017), o conhecimento do grau de perigo diário é uma ferramenta útil na programação de prevenção e combate aos incêndios florestais. Índices de perigo são indicadores que refletem, antecipadamente, a probabilidade de ocorrer um incêndio, assim como a facilidade do mesmo se propagar, com base nas condições atmosféricas do dia ou de uma sequência de dias (SOARES, 1972).

A estrutura que compõe os índices de perigo de incêndios é baseada nas variações de fatores meteorológicos. Os fatores determinantes do grau de perigo podem ser divididos em duas categorias: permanentes (material combustível, tipologia florestal e relevo) e variáveis (condições meteorológicas). O primeiro grupo é recomendado para se estimar o comportamento do fogo e potencial dano, pois possui maior variação no longo prazo. O grupo dos fatores variáveis corresponde a uma base sólida para estimativa do grau de perigo, pois estes fatores apresentam variação no curto prazo (NUNES, 2005; SOARES, 1984) (FIGURA 2).

FIGURA 2 - ESTRUTURA DE UM SISTEMA DE ÍNDICES DE PERIGO



Fonte: adaptado de Vélez (2009a).

No Brasil, até o grande incêndio ocorrido no estado do Paraná em 1963, não havia conhecimento da utilização de índices de perigo. Pela dificuldade na obtenção de dados, a partir dessa data foram introduzidos os índices de Angstron e de Nesterov, que para seus cálculos apenas requerem temperatura, umidade relativa do ar e precipitação (SOARES; BATISTA; TETTO, 2017; SAMPAIO, 1999).

O índice de perigo de incêndios deve ser um dos fatores fundamentais para a realização de queimas controladas, pois quanto maior o grau de perigo, maior a probabilidade da queima se tornar um incêndio (SOARES; BATISTA; TETTO, 2017).

### 3.3.1 Fórmula de Monte Alegre

Soares (1972), utilizando dados da região central do Paraná, desenvolveu o primeiro índice de perigo de incêndios do país, a Fórmula de Monte Alegre (FMA), utilizada em quase todo território nacional e em alguns países da América do Sul. Este índice caracteriza-se por ser cumulativo, além de possibilitar adaptações na escala de perigo para o aumento da sua eficiência. Sua estrutura é simples e requer apenas a umidade relativa do ar, de forma direta, e a precipitação pluviométrica, de forma indireta, para seu cálculo (SAMPALIO, 1999):

$$FMA = \sum_{i=1}^n \left( \frac{100}{H_i} \right)$$

sendo:

FMA = Fórmula de Monte Alegre;

H = umidade relativa do ar (%), medida às 13 horas;

n = número de dias sem chuva maior ou igual a 13,0 mm.

Nunes (2005) acrescentou a variável vento à fórmula original da FMA, buscando representar o comportamento do fogo, tendo sido utilizado em várias regiões do Brasil como Paraná (NUNES *et al.*, 2010; KOVALSYKI *et al.*, 2014), Minas Gerais (TORRES *et al.*, 2017) e Mato Grosso (MACHADO *et al.*, 2017), bem como em outros países como Cuba (RODRÍGUEZ *et al.*, 2012) e Moçambique (MBANZE *et al.*, 2017).

### 3.3.2 Fire Weather Index

As pesquisas sobre a classificação do perigo de incêndios começaram no Canadá com J. G. Wright em 1925, no desenvolvimento do *Tracer Index*, primeiro índice do país. Este serviu de base para o sistema canadense de perigo de incêndios (*Canadian Forest Fire Weather Index System – CFFWIS*), resultado de uma série de pesquisas caracterizadas pela avaliação do perigo baseado em experimentos de campo (VAN WAGNER, 1987).

O *Fire Weather Index* (FWI), índice de perigo canadense, é um sistema de indexação composto pela combinação de um conjunto de cinco sub-índices, sendo os três primeiros da estrutura referentes ao teor de umidade dos combustíveis e os dois restantes, índices de comportamento do fogo (VAN WAGNER, 1974).

Viegas *et al.* (1999) afirmam que o sistema canadense, caracterizado pelo índice de perigo de incêndios FWI, é um modo consistente e com melhor desempenho se comparado com outros índices, seja na predição de ocorrências ou área queimada por dia, sendo um dos índices mais utilizados no mundo (BAKŠIĆ; BAKŠIĆ; JAZBEC, 2017; BIANCHI; DEFOSSE, 2013).

Sampaio (1999), ao comparar quatro índices de perigo de incêndio, constatou que o FWI foi mais eficiente que os índices de Nesterov, Telicyn e FMA. Em estudo realizado no Reino Unido de 2010 a 2012, de Jong *et al.* (2016), concluíram que o FWI se destaca como o melhor índice de perigo na primavera, estação de incêndios florestais na região. Torres *et al.* (2017) comprovaram que os valores mensais do índice FWI revelaram correlação mais alta com os totais mensais de ocorrências para pesquisa realizada em Juiz de Fora, Minas Gerais.

### 3.3.3 Código de Umidade do Combustível Fino

O Código de Umidade do Combustível Fino (*Fine Fuel Moisture Code* - FFMC) é um dos componentes primários do FWI padrão e é calculado a partir de leituras meteorológicas realizadas às 12 h, horário com maior perigo de incêndios (VAN WAGNER, 1974). O FFMC estima, por meio de uma combinação de modelos, o teor de umidade dos combustíveis com diâmetro menor que 0,7 cm em função da umidade de equilíbrio e do *timelag* (VAN WAGNER, 1987).

Considerando uma medida por dia insuficiente para representar o perigo de incêndios por várias horas, Van Wagner (1977) desenvolveu o Código Horário de Umidade do Combustível Fino (*Hourly Fine Fuel Moisture Code* - HFFMC), esse sendo computado com uma periodicidade de uma hora. Van Wagner alegava que materiais como gramíneas e líquens ganham ou perdem umidade de forma mais rápida que acículas. O HFFMC serviu como base para o desenvolvimento de outros índices de perigo como o FFMC para combustíveis compactados (MAST) de Schiks e Wotton (2014), o HFFMC para *Pinus halepensis* (BAKŠIĆ; BAKŠIĆ; JAZBEC, 2017) e na estimativa do teor de acículas mortas de árvores de *Pinus contorta* ex Loud. var. *latifolia* Engelm sob ataque de *Dendroctonus ponderosae* Hopkins, para prevenção de incêndios de copa (PAGE; JENKINS; ALEXANDER, 2015).

Para uma melhor resposta nas regiões de savana no Canadá, Wotton (2009) adaptou o HFFMC dando origem ao Código de Umidade do Combustível Herbáceo (GFMC). Esse modelo inclui o conceito de temperatura do combustível em função da exposição das gramíneas à radiação solar, sendo a estimativa do teor de umidade muito mais próxima à observada em campo do que a obtida por meio do HFFMC. Van Wagner (1969) explica que a radiação solar aquece o combustível, deixando a temperatura do ambiente próximo maior do que a registrada pela estação meteorológica, já o vento movimentava a massa de ar quente próxima ao solo e resfria o material.

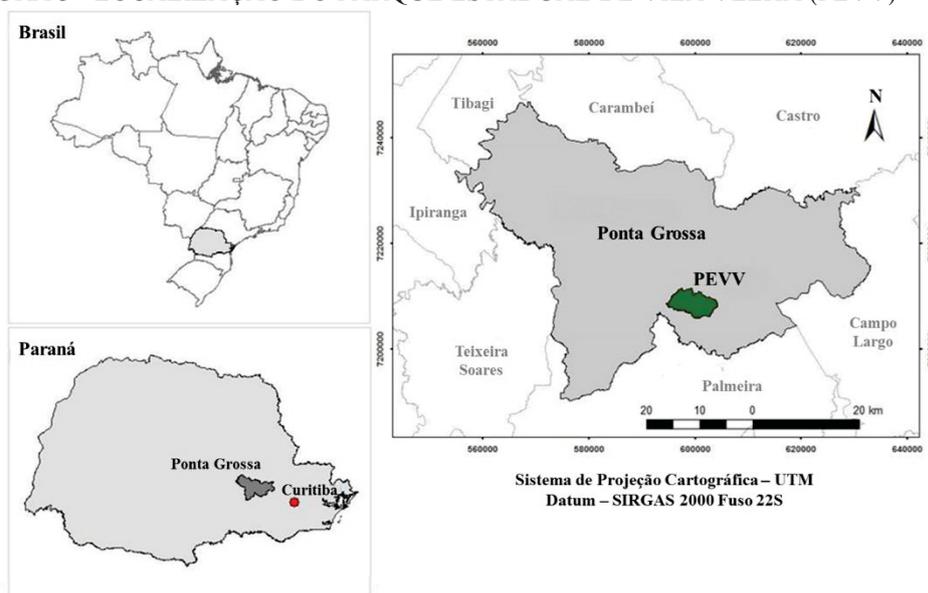
O HFFMC fornece previsões robustas e precisas de ocorrências e propagação de incêndios, trazendo informações para a população e auxilia na alocação de recursos para supressão e combate (SLIJEPCEVIC *et al.*, 2015; HIGGINS *et al.*, 2011). Porém, Slijepcevic *et al.* (2015) alertam para a necessidade de calibração das equações utilizadas para estimar o teor de umidade, pelo fato do FFMC originalmente ser concebido para florestas compostas pelas espécies *Pinus banksiana* e *Pinus ponderosa*, no Canadá (WHITE, 2018).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O Parque Estadual de Vila Velha (PEVV), criado pelo Decreto n.º 1.292, de 12 de outubro de 1953, está localizado no Segundo Planalto Paranaense, na região dos Campos Gerais entre as coordenadas 25° 12' 34" a 25° 15' 35" S e 49° 58' 04" a 50° 03' 37" W (FIGURA 3), com uma área de 3.122,11 ha (INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ (IAP), 2004).

FIGURA 3 - LOCALIZAÇÃO DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA (PEVV)

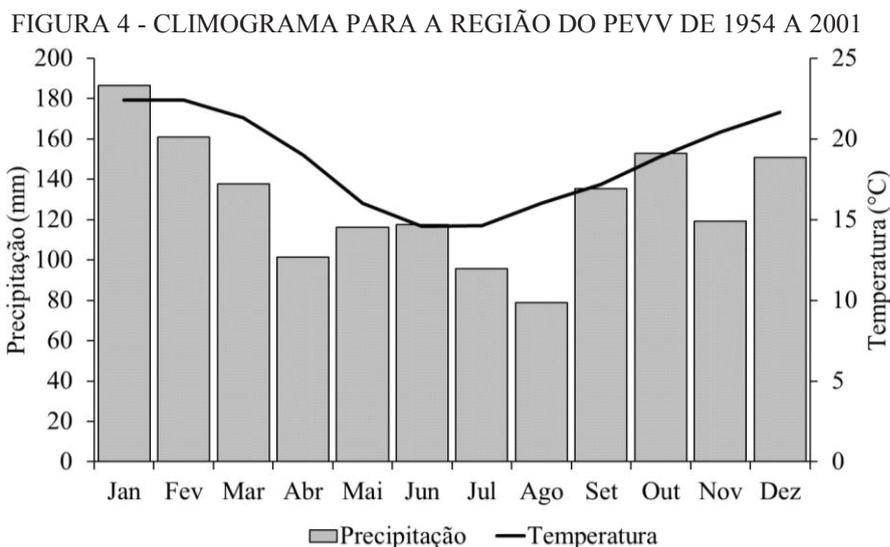


Fonte: o autor (2018).

De acordo com a lei n.º 9.985, de 18 de julho de 2000, do SNUC, O PEVV é uma unidade de conservação da categoria parque, que visa à preservação da natureza e possibilita somente o uso indireto dos seus recursos naturais (BRASIL, 2000).

O PEVV tem como principal finalidade a proteção de formações areníticas e de remanescentes dos campos nativos do Paraná de relevante valor cênico, científico e ambiental.

O clima predominante na região, segundo a classificação de Köppen, é o Cfb – clima temperado, que se caracteriza pela temperatura média do mês mais frio inferior a 18 °C, com verões frescos, no qual a temperatura média do mês mais quente é inferior a 22 °C e sem estação seca definida (ALVARES *et al.*, 2013; SOARES; BATISTA; TETTO, 2015) (FIGURA 4).



FONTE: adaptado de IAPAR (2005).

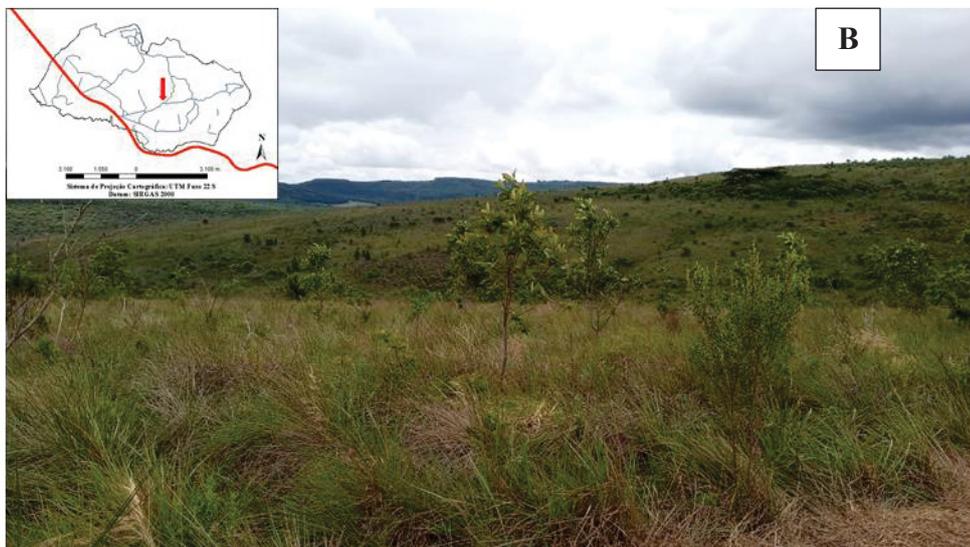
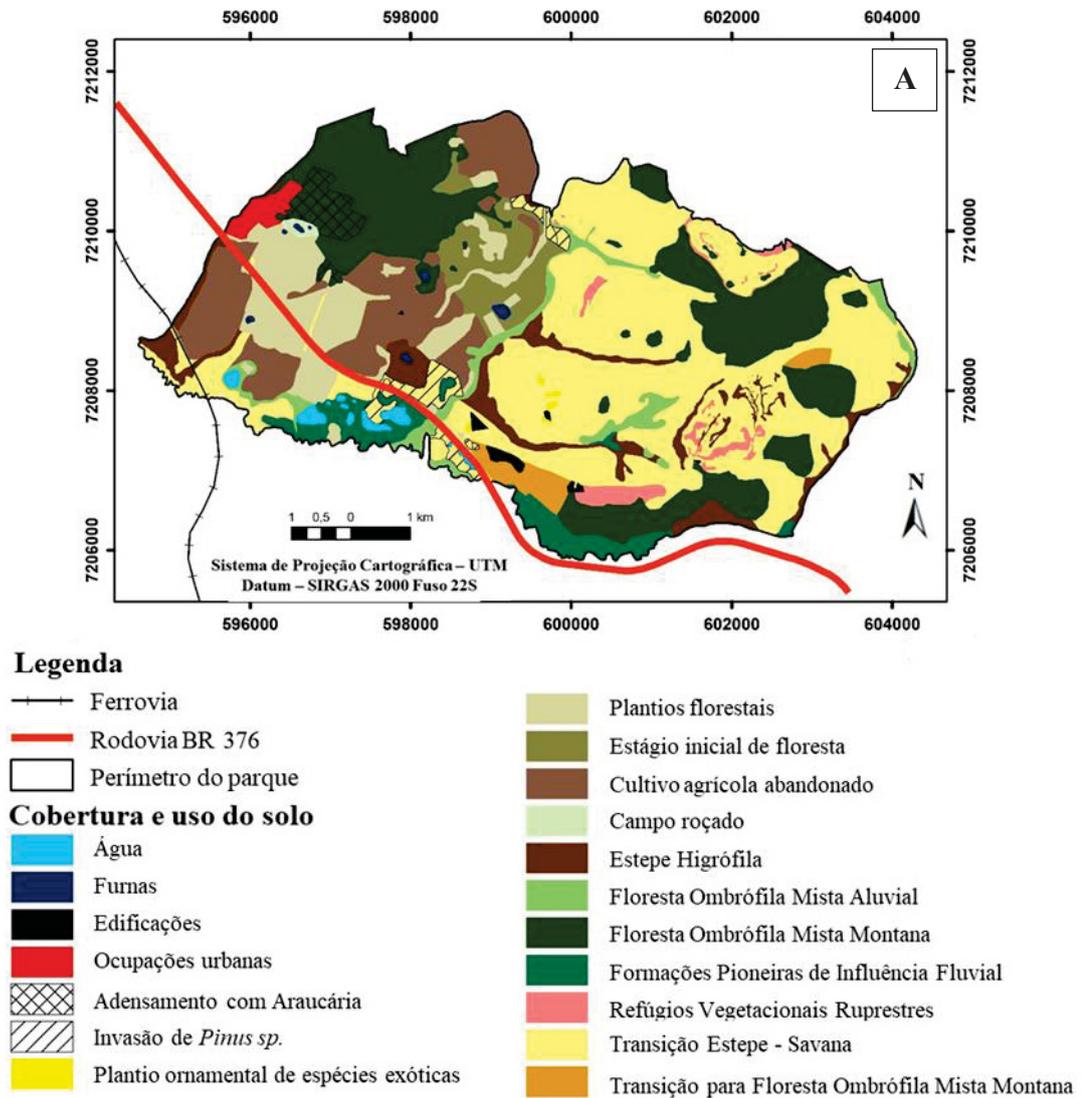
Os meses de janeiro e fevereiro apresentam as temperaturas médias mais elevadas (21,4 °C), enquanto os meses de junho e julho apresentam as médias mais baixas (13,8 °C) (INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR), 2015).

A precipitação total anual média é de 1.554 mm. A estação chuvosa inicia-se em setembro e o mês de agosto é o mais seco do ano, com precipitação média de 78 mm (IAP, 2004). O regime de ventos predominantes é nordeste (NE), com velocidade média entre 3 e 4 m/s (IAPAR, 2015).

A vegetação predominante na região do PEVV é constituída de campos limpos do tipo estepe gramíneo-lenhosa, que ocupam a maioria dos topos de elevações e encostas, sendo interrompidos pela ocorrência de fragmentos de floresta ombrófila mista (MELO, 2006). No entanto, Moro (2012) caracteriza a vegetação presente no parque como campo sujo com fácies de cerrado, uma transição entre a vegetação de estepe e savana conforme a FIGURA 5A.

A área de coleta foi alocada em uma região de estepe parque (campo sujo) (FIGURA 5B), que possui como característica distinta a presença de dois estratos: a) um superior arbóreo baixo, com indivíduos de famílias como Lythraceae e Anacardiaceae; e b) um inferior com predomínio das gramíneas *Paspalum notatum* Flügge (grama-forquilha) e *Axonopus fissifolius* (Raddi) Kuhl. (grama-tapete ou grama-jesuíta), *Andropogon lateralis* Ness (capim-caninha) e *Stipa* spp. (capim-flechinha) (IBGE, 2012).

FIGURA 5 - VEGETAÇÃO DO PARQUE ESTADUAL DE VILA VELHA (A) E LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE COLETA (B).



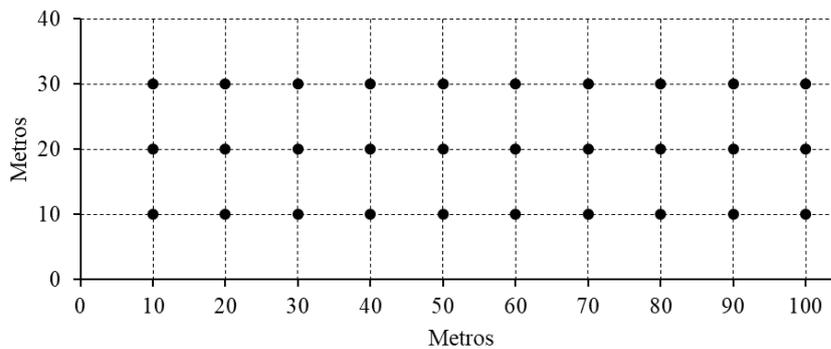
Fonte: adaptado de IAP (2004) e o autor (2019).

## 4.2 MODELAGEM PARA ESTIMATIVA DO TEOR DE UMIDADE

### 4.2.1 Caracterização do material combustível

As coletas foram realizadas entre 26 de junho e 7 de julho de 2018 em uma área de estepe Parque do Parque Estadual de Vila Velha (SEGER *et al.*, 2018; IAP, 2004). Foram realizados levantamentos de quantidade de material combustível para caracterização da área. Os procedimentos de coleta seguiram elementos metodológicos propostos por Brown, Oberheu e Johnston (1982) e aplicados por Beutling *et al.* (2012) e Seger (2015). Para o desenvolvimento das coletas foram distribuídos 30 pontos de forma sistemática, com espaçamento de 10 m x 10 m entre os pontos de amostragem (FIGURA 6).

FIGURA 6 - ESQUEMA DE ALOCAÇÃO DOS PONTOS DE AMOSTRAGEM



Fonte: o autor (2019).

Esses pontos serviram para a caracterização do material combustível e, posteriormente, para a obtenção da variação horária do teor de umidade. A intensidade amostral foi calculada em função da variância da carga obtida dos materiais conforme seu tamanho e tipo, para populações infinitas, com a utilização da seguinte fórmula:

$$N = \frac{t^2 S_x^2}{E^2}$$

sendo:

$N$  = número de amostras;

$t^2$  = valor de t na tabela de Student;

$S_x^2$  = variância;

$E^2$  = erro amostral.

Conforme Brown, Oberheu e Johnston (1982), são necessárias de 15 a 20 amostras para um erro amostral de 20%. Para esse trabalho foram coletadas 21 amostras de cada tipo e tamanho de material combustível utilizando um erro amostral de 15% até que a intensidade amostral fosse atingida (SEGER *et al.*, 2018). As amostras coletadas foram compostas de material combustível do tipo perigoso, que compreende as gramíneas, pequenos galhos, líquens e musgos em estado seco e verdes com diâmetro menor que 0,7 cm (SOARES; BATISTA; TETTO, 2017). Para isso foi utilizado um quadro de PVC de 1,0 m x 1,0 m depositado próximo a cada ponto e junto ao solo para a retirada do material (FIGURAS 7A e 7B). Todo o material coletado foi caracterizado como morto, vivo e miscelânea, tendo sua massa úmida determinada em campo com uso de dinamômetros de 2,5 kg e 20 g de precisão.

FIGURA 7 - PROCEDIMENTO DE COLETA E SECAGEM DO MATERIAL COMBUSTÍVEL



Fonte: o autor (2019).

Das amostras totais, sub-amostras foram retiradas e embaladas em sacos hermeticamente fechados e levadas ao Laboratório de Incêndios Florestais, da Universidade Federal do Paraná, para secagem em estufa. As sub-amostras foram colocadas em sacos de papel e submetidas a uma temperatura de 75 °C até a obtenção de massa constante (FIGURAS 7C e 7D). Após a determinação da massa seca, o teor de umidade foi calculado por meio da seguinte equação:

$$m_f = \frac{m_u - m_s}{m_s} * 100$$

sendo:

$m_f$  = teor de umidade em %;

$m_u$  = massa úmida em gramas;

$m_s$  = massa seca em gramas.

Os resultados obtidos foram utilizados para o cálculo do GFMC.

#### 4.2.2 Obtenção dos dados de umidade de equilíbrio

Os testes de adsorção e dessorção seguiram a metodologia proposta por Lopes (2013) e Bakšić, Bakšić e Jazbec (2017). Para tanto, foi construída uma câmara climática em refrigerador com quatro atuadores para controle de temperatura e umidade conforme a FIGURA 8.

FIGURA 8 - CÂMARA CLIMÁTICA UTILIZADA



Fonte: o autor (2019).

O equipamento foi desenvolvido sobre o microcontrolador TM4C1294 da *Texas Instruments Incorporation*. com atuadores de refrigeração e aquecimento, bem como umidificação e desumidificação que conferiram intervalos de 10 a 40 °C de temperatura e 25 a 95% de umidade relativa, respectivamente. Uma balança de precisão de 0,5 grama foi desenvolvida na plataforma livre *Arduino* em linguagem C/C++ com saída serial e alimentação em porta universal (*Universal Serial Bus – USB*).

Foram preparadas três amostras de 100 gramas, compostas por material combustível morto a 0% de teor de umidade e condicionadas em bandejas de alumínio (FIGURA 9A), para a obtenção dos dados de umidade de equilíbrio na câmara (FIGURA 9B) e posterior ajuste dos modelos.

FIGURA 9 – PREPARAÇÃO E SECAGEM DAS AMOSTRAS (A) E DISPOSIÇÃO DAS BALANÇAS NA CÂMARA CLIMÁTICA (B).



Fonte: o autor (2019).

A temperatura foi fixada em 26,7 °C e os testes de umidade de equilíbrio ocorreram nas faixas de 30, 40, 50, 60, 70, 80 e 90% de umidade relativa, conforme a metodologia proposta por Van Wagner (1972). Com os dados obtidos foi possível o ajuste de modelos para a determinação do *timelag*, conforme Lopes *et al.* (2014), baseados na equação desenvolvida por Byram (1963).

Os modelos utilizados para o ajuste foram o exponencial puro de Byram (1963) e o exponencial de um-termo proposto por Henderson e Pabis (1961):

$$E_{(t)} = e^{-kt}$$

$$E_{(t)} = a_1 e^{-kt}$$

sendo:

$E$  = fração de umidade remanescente no material combustível;

$t$  = tempo em horas;

$a$  = parâmetros de ajuste;

$e$  = base dos logaritmos naturais (2,718282);

$k$  = *timelag*.

Segundo Simard (1968a) o *timelag* é o tempo que o combustível leva para perder 63,2% do vapor de umidade evaporável até atingir o equilíbrio, configurando assim a necessidade de vários tempos de resposta até que a umidade de equilíbrio seja alcançada. As curvas de sorção obtidas foram divididas em quatro tempos de resposta tanto para a secagem como

para a umidificação, onde  $E$  corresponde a 0,368, 0,135, 0,050 e 0,018 para a adsorção e 0,632, 0,865, 0,950 e 0,982 para a dessorção, conforme Lopes *et al.* (2014).

As massas obtidas foram coletadas no interior da câmara e registradas informaticamente com periodicidade de cinco minutos até a amostra atingir massa constante e, por fim, determinar a taxa de alteração do teor de umidade no sentido do equilíbrio. As últimas quatro horas de cada teste foram submetidas ao teste de comparação de médias Student-Newman-Keuls a 95% de probabilidade para a determinação da umidade de equilíbrio.

Portanto, os dados desse estudo foram ajustados para os modelos comuns de adsorção e dessorção propostos por Van Wagner (1972) para a estimativa da umidade de equilíbrio para uma série de materiais combustíveis finos:

$$EMC = \left( \alpha * H^\beta + \gamma * e^{\frac{H-100}{\gamma}} \right) + 0,27(26,7 - T) * (1 - e^{-0,115 * H})$$

sendo:

$EMC$  = umidade de equilíbrio em %;

$H$  = umidade relativa em %;

$T$  = temperatura em °C;

$e$  = base dos logarítimos naturais (2,718282);

$\alpha, \beta, \gamma, \delta$  = coeficientes.

Para avaliar a qualidade de ajuste dos modelos não lineares, os parâmetros estatísticos utilizados foram: a análise da distribuição dos resíduos, o erro absoluto médio (EAM), a raiz do erro quadrático médio (REQM) e o coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

Os modelos de adsorção e dessorção do HFFMC e do GFMC foram substituídos pelos obtidos para a estepe, assim como para o tempo de resposta, os coeficientes foram substituídos nas equações das taxas de adsorção e dessorção ( $K_d$  e  $K_w$ ).

#### 4.2.3 Determinação do Código Horário de Umidade do Combustível Fino (HFFMC)

O cálculo do HFFMC foi dividido em duas fases: da precipitação e da secagem. A primeira consistiu na estimativa da influência da precipitação e a segunda na determinação da variação do teor de umidade caso o combustível estivesse secando ou umedecendo. A TABELA 1 mostra o procedimento de cálculo do HFFMC passo a passo, sendo que os coeficientes originais foram deixados para facilitar a compreensão.

TABELA 1 - PROPRIEDADES DO HOURLY FINE FUEL MOISTURE CODE

Passos	Equações
1	$m_0 = 147,2 (101 - HFFMC_0)/(59,5 + HFFMC_0)$
<b>Fase de precipitação</b>	
2a	Se $r_0 > 0,5$ mm $r_f = r_0 - 0,5$
2b	Se $r_0 \leq 0,5$ mm $m_r = m_0$
3a	Se $m_0 \leq 150\%$ $m_r = m_0 + 42,5r_f(e^{-100/(251-m_0)})(1 - e^{-6,93/r_f})$
3b	Se $m_0 > 150\%$ $m_r = m_0 + 42,5r_f(e^{-100/(251-m_0)})(1 - e^{-6,93/r_f}) + 0,0015 (m_0 - 150)^2 * r_f^{0,5}$
<b>Fase de Secagem</b>	
4	$EMC_D = 0,942H^{0,679} + 11e^{(H-100)/10} + 0,18 (21,1 - T)(1 - e^{-0,115H})$
5	$EMC_W = 0,618H^{0,753} + 10e^{(H-100)/10} + 0,18 (21,1 - T)(1 - e^{-0,115H})$
6a	Se $m_0 > EMC_D$ , o combustível está secando, logo: $R_f = H/100$ $K_0 = 0,424 * (1 - R_f^{1,7}) + 0,0694 * W^{0,5} * (1 - R_f^8)$ $K_d = K_0 * 0,581 * e^{0,0365T}$ $MC = EMC_D + (m_0 - EMC_D) * e^{-K_d}$
6b	Se $m_0 < EMC_W$ , o combustível está umedecendo, logo: $R_f = (100 - H)/100$ $K_1 = 0,424 * (1 - R_f^{1,7}) + 0,0694 * W^{0,5} * (1 - R_f^8)$ $K_w = K_1 * 0,581 * e^{0,0365T}$ $MC = EMC_W + (EMC_W - m_0) * e^{-K_w}$
6c	Se $EMC_W \leq m_0 \leq EMC_D$ , o teor de umidade está constante, então: $MC = m_0$
7	$HFFMC = 59,5 (250 - MC)/(147,2 + MC)$

Nota: T = temperatura (°C); H = umidade relativa (%); W = velocidade do vento (km/h); r = precipitação (mm).  
Fonte: adaptado de Van Wagner (1987).

O primeiro passo para o cálculo do HFFMC é a fase de precipitação. Após a determinação do teor de umidade em porcentagem ( $m_0$ ), calcula-se a chuva acumulada em milímetros ( $r_0$ ) na hora anterior à realização dos cálculos. Se  $r_0$  for maior que 0,5 mm, calcula-se a precipitação efetiva  $r_f$  pelo passo (2a). Caso  $m_0$  seja menor ou igual que 150%, o teor de umidade influenciado pela chuva ( $m_r$  - também em %) é calculado pela equação (3a). Caso  $m_0$  seja maior que 150%,  $m_r$  deve ser calculado pelo passo 3b. Não ocorrendo precipitação maior que 0,5 mm, então  $m_r$  é igual a  $m_0$  (passo (2b)). Com isso, encerra-se a fase de influência da precipitação.

A fase de secagem serve para determinar se o material combustível está secando ou não. Para isso, calcula-se o teor de umidade de equilíbrio para dessorção ( $EMC_D$ ) pela equação

do passo (4) e o teor de umidade de equilíbrio para adsorção ( $EMC_W$ ) pela equação do passo (5), ambos obtidos em porcentagem. Se  $m_0$  for maior que  $EMC_D$ , o combustível está secando, portanto, utiliza-se as equações da taxa de dessecção ( $K_d$ ) do passo (6a) para a determinação do teor de umidade da hora ( $MC = \%$ ). Caso o combustível esteja umedecendo ( $m_0 < EMC_W$ ), o passo (6b) será executado.

O HFFMC foi calculado conforme o passo (7). Na presença de um teor de umidade constante ( $EMC_W \leq m_0 \leq EMC_D$ ), o teor de umidade daquela hora foi o mesmo para a hora seguinte como diz o passo (6c), reiniciando os cálculos do HFFMC.

#### 4.2.4 Determinação do Código de Umidade do Combustível Herbáceo (GFMC)

O cálculo do código de umidade do combustível herbáceo, proposto por Wotton (2009), possui processo semelhante ao do FFMC. Também consiste na determinação do teor de umidade em porcentagem ( $m_0$ ) da chuva acumulada em milímetros ( $r_0$ ) no dia anterior à realização dos cálculos. O extrato herbáceo responde a qualquer variação da precipitação, isto é, se houver chuva no dia anterior, o teor de umidade influenciado pela chuva ( $m_r$ ) será calculado pela equação (2), que leva em conta a carga do material combustível em  $\text{kg/m}^2$  ( $\rho_{fl}$ ). Caso  $m_0$  seja maior que 250%, o teor de umidade influenciado pela chuva ( $m_r$ ) será igual a 250%, pois se trata da capacidade máxima de adsorção de umidade do extrato herbáceo, pois não existe, na prática, limites que interceptem a influência da chuva como no FFMC original (WOTTON, 2009). A TABELA 2 mostra o procedimento de cálculo do GFMC.

TABELA 2 - PROPRIEDADES DO GRASS FUEL MOISTURE CODE

Passos	Cálculo
1	$m_0 = 147,2 (101 - GFMC_0)/(59,5 + GFMC_0)$
<b>Fase de precipitação</b>	
2	Se $r_0 > 0 \text{ mm}$ $m_r = m_0 + (r_0 / \rho_{FL}) * 100$ Se $MC_r > 250 \%$ , então $MC_r = 250 \% = m_0$
3	$T_f = T + 35,07 \cdot I_{sol} * e^{-0,06215 * W}$
4	$e_s(T) = 6,107 * 10^{\frac{7,5 * T}{237 + T}}$ $e_s(T_f) = 6,107 * 10^{\frac{7,5 * T_f}{237 + T_f}}$
5	$H_f = \frac{H}{100} * \frac{e_s(T)}{e_s(T_f)}$
<b>Fase de secagem</b>	
6	$EMC_D = \left( 1,62 * H_f^{0,532} + 13,7 * e^{\frac{H_f - 100}{13,0}} \right) + 0,27(26,67 - T_f) * (1 - e^{-0,3115 * H_f})$
7	$EMC_W = \left( 1,62 * H_f^{0,512} + 12,0 * e^{\frac{H_f - 100}{18,0}} \right) + 0,27(26,67 - T_f) * (1 - e^{-0,3115 * H_f})$
8a	Se $m_0 > EMC_D$ , o combustível está secando, logo: $R_f = H/100$ $K_{GRASS} = 0,89 * e^{0,0365 * T_f} [0,424 * (1 - R_f^{1,7}) + 0,0694 * W^{0,5} * (1 - R_f^8)]$ $MC = EMC_D + (m_0 - EMC_D) * e^{-K_{GRASS} * t}$
8b	Se $m_0 < EMC_W$ , o combustível está umedecendo, logo: $R_f = (100 - H)/100$ $K_{GRASS} = 0,897 * e^{0,0365 * T_f} [0,424 * (1 - R_f^{1,7}) + 0,0694 * W^{0,5} * (1 - R_f^8)]$ $MC = EMC_W + (m_0 - EMC_W) * e^{-K_{GRASS} * t}$
8c	Se $EMC_W \leq m_0 \leq EMC_D$ , o teor de umidade está constante, então: $MC = m_0$
9	$GFMC = 59,5 (250 - MC)/(147,2 + MC)$

Nota: T = temperatura (°C); H = umidade relativa (%); W = velocidade do vento (km/h); r = precipitação (mm); L<sub>e</sub> = duração do dia (h).

Fonte: adaptado de Van Wagner (1987).

A fase de secagem desse código acrescenta o cálculo da temperatura do combustível  $T_f$ , que utiliza a radiação solar em kW/m<sup>2</sup> ( $I_{sol}$ ). A partir da temperatura do combustível foi estimada a pressão de saturação do vapor ( $e_s(T_f)$ ) em função da temperatura ambiente ( $e_s(T)$ ), utilizando a equação de Tetens (BAUMGARTNER *et al.*, 1982). Com a pressão de saturação do vapor calculada, a umidade relativa do combustível ( $RH_f$ ) foi determinada e, a partir dela, se obteve a taxa de de secagem ou de umedecimento ( $K_{GRASS}$ ).

Em seguida, foram realizados os cálculos do  $EMC_D$  (passo 6) e do  $EMC_W$  (passo 5), ambos obtidos em porcentagem. Se  $m_0$  for maior que  $EMC_D$ , o combustível está secando, portanto, foram utilizadas as equações do passo (8a) para a determinação do teor de umidade do dia ( $MC = \%$ ). Se o combustível estiver umedecendo ( $m_0 < EMC_W$ ) o passo (8b) será executado.

O GFMC foi calculado conforme o passo (9). Na presença de um teor de umidade constante ( $EMC_W \leq m_0 \leq EMC_D$ ), o teor de umidade do dia será o mesmo para o dia seguinte como diz o passo (8c), reiniciando os cálculos do GFMC.

### 4.3 VALIDAÇÃO DOS RESULTADOS

#### 4.3.1 Teor de umidade

Essa etapa do trabalho seguiu elementos propostos por Wotton (2009), Bakšić, Bakšić e Jazbec (2017) e Alves *et al.* (2009). As coletas foram realizadas durante o inverno de 2018 e divididas em duas campanhas de cinco dias com condições meteorológicas estáveis. A primeira realizou-se no período de 10/07/2018 a 14/08/2018 e a segunda de 04/09/2018 a 08/09/2018. Foram utilizados os três transectos com dez pontos de coletas já instalados na área de estudo, num total de 30 amostras por dia, totalizando 300 amostras para o estudo (FIGURA 10).

FIGURA 10 - SEQUÊNCIA DE COLETA DO TEOR DE UMIDADE



Fonte: o autor (2019).

O período de coletas foi realizado das 8:30h às 17:30h, totalizando dez horas de coleta. Foram realizadas três coletas com finalidade de obter uma média do teor de umidade por hora. Não foi possível realizar coletas além das 17:30h devido à falta de iluminação e ao horário de funcionamento do parque.

Amostras destrutivas foram coletadas e armazenadas em sacos hermeticamente fechados e determinadas suas massas em campo com auxílio de uma balança digital com precisão de 1 g. O teor de umidade observado serviu como validação para o teor de umidade estimado pelos modelos dos índices. O teor de umidade foi estimado pelo HFFMC e GFMC, em suas formas originais, e comparados com as estimativas geradas pelo GFMC adaptado para o PEVV.

A validação dos resultados foi feita a partir da análise da distribuição dos resíduos, do erro absoluto médio (EAM) e do teste de correlação de Pearson ( $r$ ) (WOTTON, 2009; BAKŠIĆ; BAKŠIĆ; JAZBEC, 2017).

#### 4.3.2 Análise da eficiência dos índices

Antes dos cálculos para determinação da eficiência dos índices, foi realizada uma análise do perfil dos incêndios florestais para a área estudada. Essa etapa do estudo utilizou elementos metodológicos propostos por Tetto, Batista e Soares (2012), Santos *et al.* (2018) e Kovalskyki (2016).

Os dados de ocorrências de incêndios no período de 2007 a 2016 foram obtidos pelo Sistema de Registro e Estatística de Ocorrências (SysBM), do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Paraná (2019). Não foram utilizados dados de 2017 devido a uma mudança no sistema de registro de dados de ocorrências do Corpo de Bombeiros. Foram considerados incêndios em vegetação com registro de áreas em hectares maiores do que zero. Os dados meteorológicos foram fornecidos pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR) (2019).

Devido ao pequeno número de ocorrências encontrado para o Parque Estadual de Vila Velha, a realização da análise de eficiência dos índices se deu considerando as ocorrências referentes ao município de Ponta Grossa, conforme procedimento realizado por Kovalskyki (2016). O processamento dos dados foi feito com auxílio dos *softwares Microsoft Excel 2016, Statgraphics centurion XV e IBM SPSS Statistics 25*.

A Fórmula de Monte Alegre, utilizada na comparação da eficiência, foi calculada pela seguinte equação:

$$FMA = \sum_{i=1}^n \left( \frac{100}{H_i} \right)$$

sendo:

FMA = Fórmula de Monte Alegre;

$H$  = umidade relativa do ar (%), medida às 13 horas;

$n$  = número de dias sem chuva maior ou igual a 13,0 mm;

A FMA se caracteriza como um índice acumulativo e está sujeita a restrições de precipitação do dia anterior (TABELA 3).

TABELA 3 - RESTRIÇÕES A SOMATÓRIA DA FMA, DE ACORDO COM A PRECIPITAÇÃO DO DIA

Chuva do dia (mm)	Modificação no cálculo
≤ 2,4	Nenhuma
2,5 a 4,9	Abater 30% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia
5,0 a 9,9	Abater 60% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia
10,0 a 12,9	Abater 80% na FMA calculada na véspera e somar (100/H) do dia
> 12,9	Interromper a somatória (FMA = 0) e recomeçar o cálculo no dia seguinte ou quando a chuva cessar

Fonte: Soares, Batista e Tetto (2017).

O cálculo do código de umidade do combustível herbáceo, proposto por Wotton (2009), possui processo semelhante ao do FFMC. Também consiste na determinação do teor de umidade em porcentagem ( $m_0$ ) da chuva acumulada em milímetros ( $r_0$ ) no dia anterior à realização dos cálculos. Utiliza as equações de umidade de equilíbrio e converte o valor do teor de umidade do combustível herbáceo em uma escala de grau de perigo. A interpretação do grau de perigo original de cada índice pode ser feita através das escalas a seguir (TABELA 4).

TABELA 4 - ESCALA DE PERIGO DO GFMC E DA FMA

Valor do GFMC	Grau de perigo	Valor da FMA	Grau de perigo
Baixo	≤ 63,0	≤ 1,0	Nulo
Moderado	63,1 a 84,0	1,1 a 3,0	Pequeno
Alto	84,1 a 88,0	3,1 a 8,0	Médio
Muito alto	88,1 a 91,0	8,1 a 20,0	Alto
Extremo	> 91,0	> 20,0	Muito alto

Fonte: Van Wagner (1987); Soares, Batista e Tetto (2017).

O GFMC adaptado e a FMA calculada foram submetidas à análise da Área Sob a Curva (ASC) Característica de Operação do Receptor (COR), método muito utilizado para a determinação da capacidade preditiva de modelos meteorológicos (JOLLIFFE; STEPHENSON, 2012). Uma análise da distribuição de frequência relativa dos dias previstos e do número de ocorrências por classe de perigo foi realizada com base nos limites de classe originais de cada índice.

Uma curva COR ideal para previsões perfeitas, assim como o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), deve possuir área igual a 1, no entanto para Pourghasemi (2015) a relação entre a precisão da previsão e o valor da AC podem ser classificados da seguinte forma: 0,5 - 0,6 (fraca), 0,6 - 0,7 (média), 0,7 - 0,8 (boa), 0,8 - 0,9 (muito boa) e 0,9 - 1 (excelente).

O processo de ajuste da Fórmula de Monte Alegre foi realizado utilizando a metodologia proposta por Nunes *et al.* (2010) que busca um comportamento no qual o maior número de dias se enquadre na classe de perigo “Nulo” e decresça para a classe “Muito alto”, bem como a maioria dos dias com ocorrência de incêndios se concentrem na classes “Alto” e “Muito alto” (WENDLING *et al.*, 2012). As classes “Baixo” e “Moderado” do GFMC, bem como as classes

“Nulo” e “Pequeno” da FMA foram consideradas como previsão de não ocorrência de incêndios (NUNES *et al.*, 2010).

A eficiência das previsões dos índices foi avaliada utilizando método de verificação de previsões dicotômicas (JOLLIFFE; STEPHENSON, 2012). Esse método consistiu na construção de uma tabela de contingência que contém os valores observados e os valores previstos para ocorrências de incêndios florestais (TABELA 5).

TABELA 5 - TABELA DE CONTINGÊNCIA UTILIZADA

Evento	Observado		Total previsto	
	Incêndio	Não incêndio		
Previsto	Incêndio	$a$	$b$	$N_2 = a + b$
	Não incêndio	$c$	$d$	$N_4 = c + d$
Total Observado	$N_1 = a + c$	$N_3 = b + d$	$N = a + b + c + d$	

Nota: a = acertos; b = alarmes falsos; c = erros; d = negativos corretos; N = número total de amostras.

Fonte: Sampaio e Soares (2000).

As variáveis para avaliação de performance recomendadas por Jolliffe e Stephenson (2012) e Sampaio e Soares (2000) foram realizadas com base no limite superior das classes “Moderado” (GFMC) e “Pequeno” (FMA) e são as seguintes:

- Acurácia ou porcentagem de sucesso (PS): trata-se da porcentagem de acertos na previsão em relação ao total observado dada pela fórmula  $(a + d) / N$ ;
- Probabilidade de detecção (POD): também conhecida como sensibilidade, é a proporção de ocorrências corretamente previstas, dada pela fórmula  $a / (a + c)$ ;
- Probabilidade de falsa detecção (POFD): também conhecida como 1- especificidade, é a proporção de não-ocorrências previstas incorretamente, obtida por meio da fórmula  $b / (d + b)$ ;
- Skill score* (SS): proposto por Sampaio e Soares (2000), é a razão da diferença entre os acertos na previsão ( $G = a + d$ ) e o número esperado de acertos ( $H = N \times (1 - p) \times (1 - q) + N \times p \times q$ ; onde:  $p = N_1 / N$  e  $q = N_2 / N$ ) é a diferença entre o número de dias observados (N) e o número de acertos ( $SS = (G - H) / (N - H)$ ).

O novo valor limiar para a declaração de probabilidade de ocorrência ou não ocorrência de incêndios foi obtido por meio do índice de união (IU), proposto por Unal (2017), que maximiza os valores de probabilidade de detecção e reduz a probabilidade de falsa detecção, sendo obtido pela seguinte equação:

$$UI = (|POD - AC| + |(1 - POFD) - AC|)$$

sendo:

UI = índice de união;

$POD$  = probabilidade de Detecção;

$POFD$  = probabilidade de não detecção;

$AC$  = área Sob a Curva.

O menor valor obtido da subtração do valor de  $AC$  dos módulos de  $POD$  e  $1 - POFD$  foi determinado como o ponto de corte ótimo para o limite superior da classe de perigo de incêndios “Moderado” e “Pequeno” do GFMC e do FMA respectivamente.

Os ajustes das escalas, bem como a análise de eficiência foram realizados em duas estações ao longo do ano (úmida e seca), para possibilitar uma ênfase no período de maior perigo de incêndios, conforme proposto por Wendling *et al.* (2012). A estação de maior incidência de incêndios foi determinada por meio de uma análise de conglomerados, pelo método proposto por Ward (1963), relacionando os dias de chuva com o número de ocorrências. A determinação da quantidade de meses que compõem a estação de incêndios baseou-se no coeficiente de fusão das distâncias euclidianas de cada amostra buscando separar o ano em dois períodos.

Dados meteorológicos diários foram utilizados para o cálculo da FMA, enquanto o GFMC adaptado foi calculado de forma horária. O índice que obteve maior PS,  $POD$ , SS e menor  $POFD$  foi considerado o mais eficiente.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL COMBUSTÍVEL

A TABELA 6 contém os valores médios da quantidade de material fino (< 0,7 cm) referente às coletas realizadas no período de junho/julho de 2019.

TABELA 6 – TIPOS E CLASSES DE MATERIAL COMBUSTÍVEL FINO

Tipo	Quantidade (t.ha <sup>-1</sup> )		Teor de umidade (%)	Representatividade (%)	N
	Verde	Seco			
Material Vivo	1,82	1,73	122,98	12,41	13
Material Morto	10,76	7,95	34,80	73,44	15
Miscelânea	2,07	1,45	51,55	14,15	15
<b>Total</b>	14,65	11,13	-	100	-

Fonte: o autor (2019).

O número de amostras (21) mostrou-se suficiente para atingir a precisão esperada conforme a coluna “N”. A carga total coletada foi de 14,65 t.ha<sup>-1</sup>, acima dos 10,99 t.ha<sup>-1</sup> encontrados por Seger *et al.* (2018) e próximo aos 12,39 t.ha<sup>-1</sup> encontrados por Rodrigues (2018), para o PEVV no período de junho.

Outro fato observado foi que o teor de umidade médio para o material morto, 34,80%, se aproxima do valor encontrado por Seger *et al.* (2013) e por Fidelis *et al.* (2010), 37,99% e 37,80%, respectivamente, em áreas de estepe gramíneo-lenhosa. Segundo Soares, Batista e Tetto (2017), a probabilidade de ignição é praticamente nula acima do limite de umidade de extinção (25 a 30%) para a maioria dos combustíveis florestais. No entanto, sabe-se que o material combustível morto, com teor de umidade abaixo do ponto de saturação das fibras (PSF) e na ausência de precipitação, troca umidade com o ambiente podendo chegar até o mínimo de 2% e quando saturado, o combustível florestal absorve umidade proveniente da precipitação (LOPES, 2013; SOARES; BATISTA; TETTO, 2017). Wotton (2009) considera que toda a água precipitada sobre as gramíneas é absorvida. Isto é, para as savanas canadenses o material combustível fino morto ocorre a uma densidade de 3 t.ha<sup>-1</sup>, quase a metade do que ocorre no PEVV (7,95 t.ha<sup>-1</sup>), contudo a mecânica de absorção continua a mesma. Considerando que a densidade da água é 1000 kg.m<sup>-3</sup> e a carga de material combustível de 0,795 kg.m<sup>-2</sup>, sabe-se que uma precipitação de 0,795 mm é o suficiente para que o material combustível absorva o equivalente a 100% de seu teor de umidade gravimétrico. Nota-se também que a proporção de material fino morto é mais representativa do que do vivo e da miscelânea, com 73,44 % da carga total coletada, indicando um acúmulo de material combustível responsável por regular a probabilidade

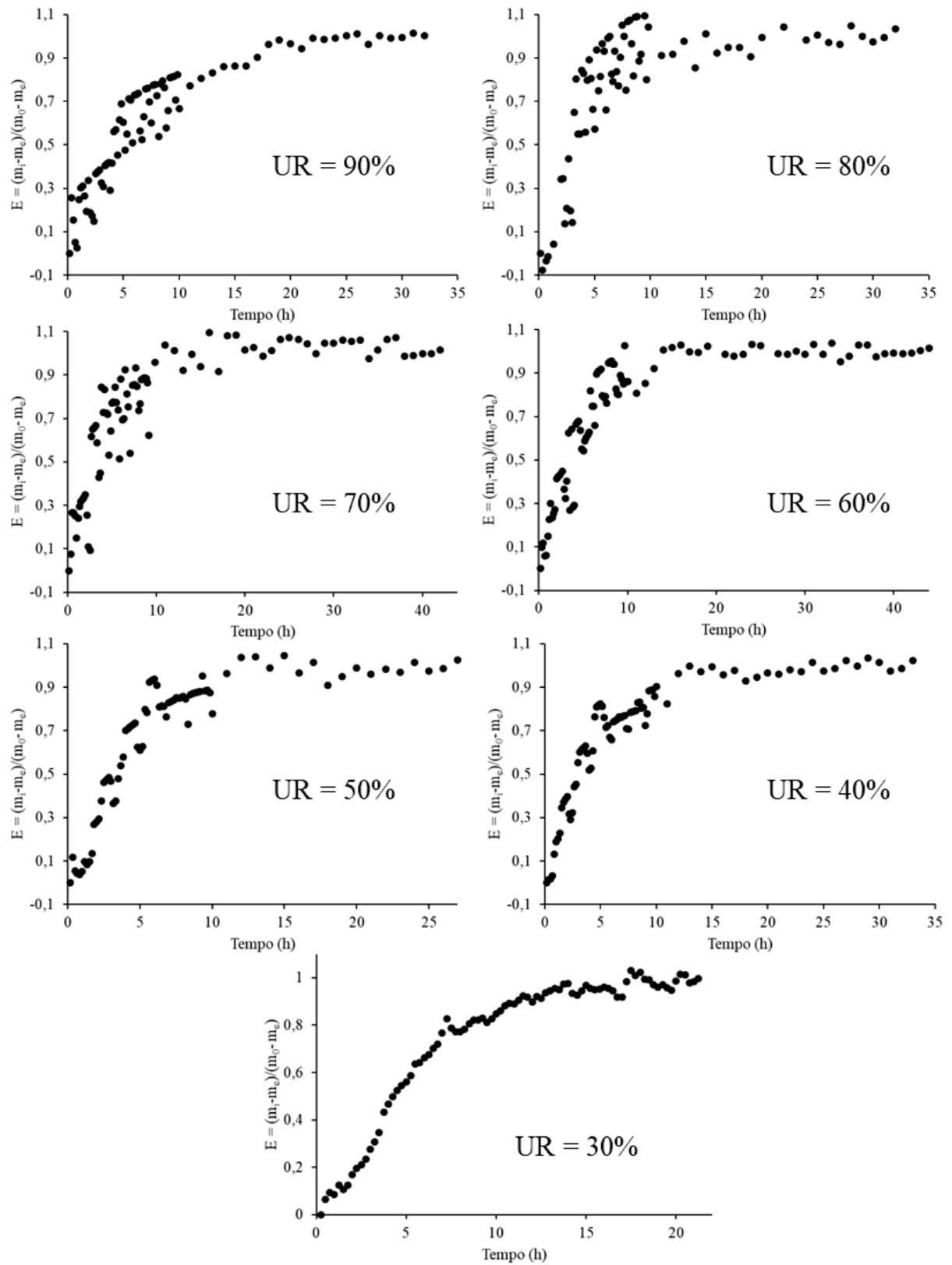
de ignição devido a exclusão de ocorrência de incêndios ao longo do tempo (FIDELIS; PIVELLO, 2011; SOARES, BATISTA; TETTO, 2017).

## 5.2 TEOR DE UMIDADE DO MATERIAL COMBUSTÍVEL

### 5.2.1 Umidade de equilíbrio

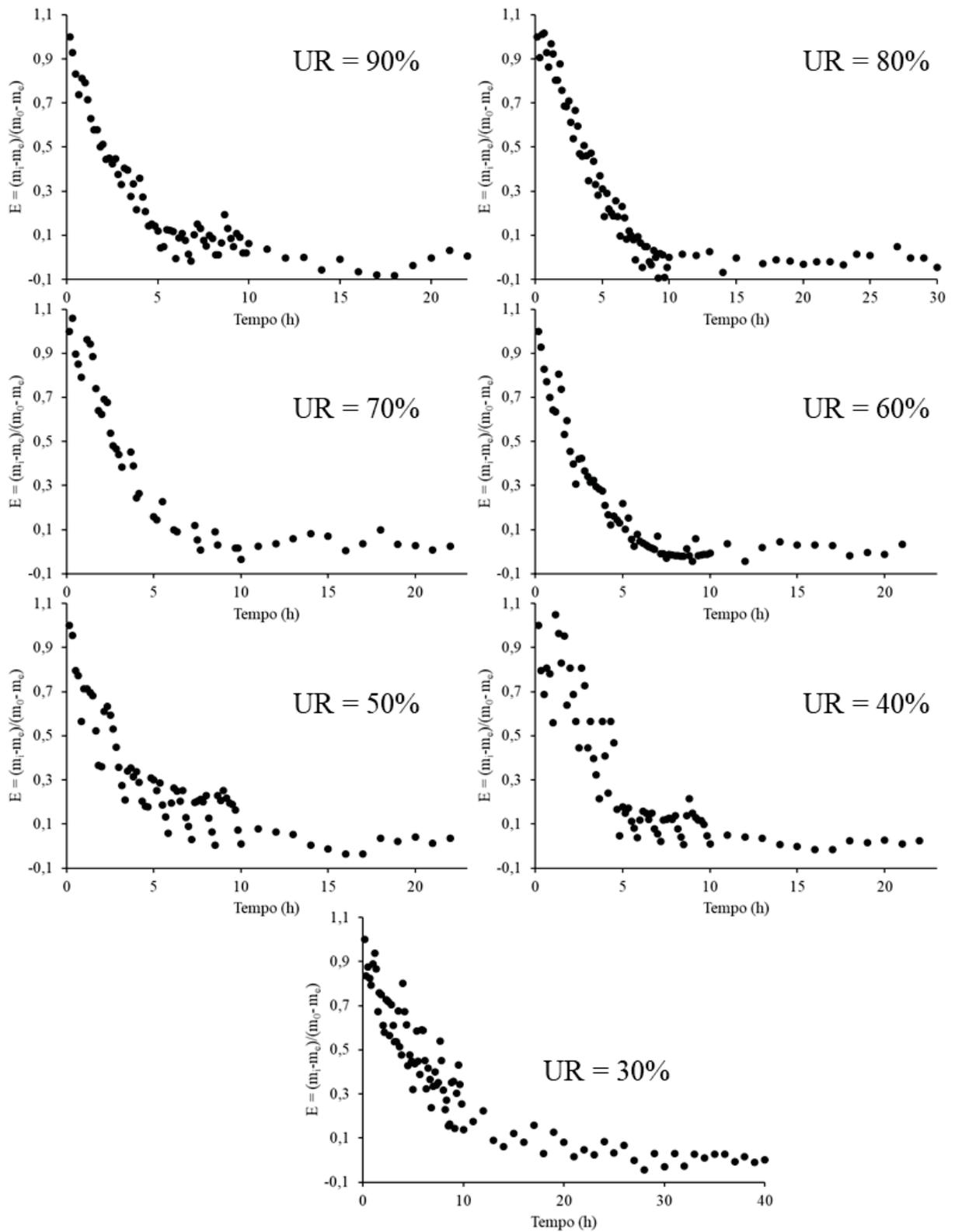
Nas FIGURAS 11 e 12 estão representadas as curvas de adsorção e dessorção para o estrato herbáceo do Parque Estadual de Vila Velha, determinadas para a temperatura do ar de 26,7 °C e umidade relativa variando de 30 a 90%, tendo a fração de umidade evaporável do combustível (E) em função do tempo em horas. Vale ressaltar que os registros de algumas leituras apresentaram ruídos devido a cortes de energia e problemas de comunicação entre a balança e o computador para registro.

FIGURA 11 – CURVAS DE ADSORÇÃO À TEMPERATURA DE 26,7 °C E UMIDADE RELATIVA DE 30 A 90%



Fonte: o autor (2019).

FIGURA 12 – CURVAS DE DESSORÇÃO À TEMPERATURA DE 26,7 °C E UMIDADE RELATIVA DE 30 A 90%



Fonte: o autor (2019).

Constatou-se que tanto as curvas de adsorção como as de desorção apresentaram um comportamento exponencial, perdendo e ganhando umidade de forma rápida no início e depois

lentamente se aproximando da umidade de equilíbrio. Contudo, assim como Lopes (2013), os processos de sorção para o estrato herbáceo do PEVV não possuem um comportamento exponencial puro, justificando o uso de constantes para um melhor ajuste da equação de tempo de resposta.

As curvas de sorção divididas em quatro tempos de resposta ( $\tau_i$ ) utilizando todos os testes realizados à temperatura de 26,7 °C, bem como os seus respectivos desvios padrões ( $s^2$ ) estão apresentados na TABELA 7.

TABELA 7 – TEMPOS DE RESPOSTA E DESVIO PADRÃO PARA A TEMPERATURA DE 26,7 °C

Processos	Nº de testes	$\tau_1$ (h)		$\tau_2$ (h)		$\tau_3$ (h)		$\tau_4$ (h)	
		Média	$s^2$	Média	$s^2$	Média	$s^2$	Média	$s^2$
Dessorção	21	2,21	1,2	2,81	1,5	4,89	2,9	5,02	3,2
Adsorção	21	3,39	2,1	3,47	2,5	6,33	2,1	2,8	4,3

Fonte: o autor (2019).

O processo de adsorção até a umidade de equilíbrio geralmente é maior do que o de dessorção (ANDERSON, 1985; SIMARD, 1968b; ANDERSON; SCHUETTE; MUTCH, 1978). Os resultados obtidos nesse trabalho reforçam essa premissa, pois o estrato herbáceo estudado precisou de 14,93 horas para perder umidade até restar 1,8% da fração de água remanescente no processo de dessorção e 15,99 horas para adsorver 98,2% de sua massa à quantidade de vapor de água disponível na câmara. Blackmarr (1971), ao estudar o tempo de resposta para *Pinus contorta* Douglas, encontrou valores em torno de 17,5 horas para dessorção, resultado esse suportado por Anderson, Schuette e Mutch (1978). Em estudos recentes, Lopes *et al.* (2014) encontraram valores de 17,73 horas para adsorção em *P. pinaster*, enquanto Bakšić, Bakšić e Jazbec (2017) encontraram 27,14 horas para que as acículas de *P. halepensis* perdessem 98,2% de sua umidade. Anderson (1985) encontrou valores de 9,24 horas de dessorção e 7,07 horas de adsorção para gramíneas da espécie *Bromus tectorum* L. e 18,32 horas para dessorção e 14,53 horas para adsorção para *Pseudoroegneria spicata* (Pursh) Á. Löve. Essas variações no tempo de resposta podem ser explicadas pela presença de ceras ou resinas, bem como as características anatômicas e condições meteorológicas em que estão inseridos os combustíveis florestais finos (VAN WAGNER, 1969; SIMARD, 1968b; ANDERSON; SCHUETTE; MUTCH, 1978).

Foi observado que os três primeiros tempos de resposta possuem padrão crescente ( $\tau_1 < \tau_2 < \tau_3$ ), comportamento semelhante ao encontrado por Lopes *et al.* (2014), Bakšić, Bakšić e Jazbec (2017) e Anderson (1985). O tempo de resposta  $\tau_4$  apresentou maior desvio padrão para ambos os processos. Isso se deve ao fato de existir uma elevada flutuação quando o combustível

atinge valores de teor de umidade próximos à umidade de equilíbrio, pois as condições atmosféricas não permanecem estáticas (LOPES, 2013). Além dos processos de troca de umidade serem uma combinação de curvas exponenciais, Simard (1968a) acrescentou que existe uma variação senoidal dentro dos processos de sorção, isto é, como o teor de umidade do material combustível varia de forma periódica ao longo do tempo, possui comportamento semelhante ao de uma onda, podendo ser explicada pelas Séries de Fourier (RICIERI, 1988).

Os modelos ajustados para a determinação do *timelag*, bem como seus coeficientes estão apresentados na TABELA 8:

TABELA 8 – MODELOS EXPONENCIAIS DE SORÇÃO E PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

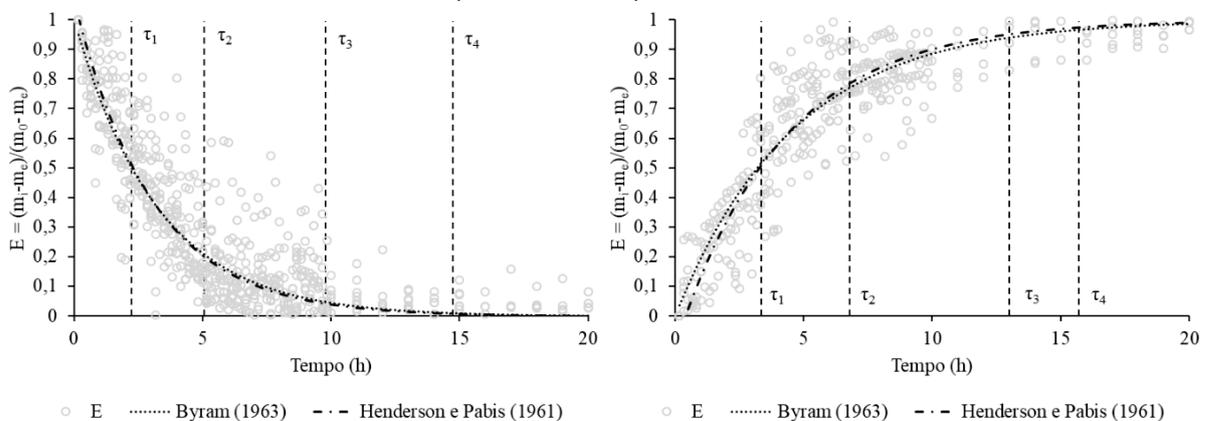
Modelo	Dessorção					Adsorção				
	$k$	$a_1$	$R^2$	EAM	REQM	$k$	$a_1$	$R^2$	EAM	REQM
Byram (1963)	0,310	-	0,828	0,092	0,126	0,217	-	0,862	0,082	0,117
Henderson e Pabis (1961)	0,330	1,065	0,830	0,090	0,125	0,241	1,103	0,869	0,082	0,114

Nota:  $k = \text{timelag}$ ;  $a_1 =$  parâmetro de ajuste;  $R^2 =$  coeficiente de determinação; EAM = erro absoluto médio; REQM = raiz do erro quadrático médio.

Fonte: o autor (2019).

Assim como em Lopes *et al.* (2014), todos os testes de sorção apresentaram um bom ajuste com os modelos testados. Os valores de  $R^2$  de 82,8% (Byram) e 83,0% (Henderson e Pabis) para dessorção e 86,2% e 86,9% para adsorção respectivamente. Todos os valores de EAM obtidos foram de 9,2 e 9% para dessorção e 8,2% para adsorção. O REQM para cada modelo de 12,6 e 12,5% para dessorção, bem como 11,7 e 11,4% para adsorção. Os parâmetros estatísticos apresentados indicam um melhor ajuste para o modelo de Henderson e Pabis. A FIGURA 13 apresenta mais detalhadamente o comportamento das equações exponenciais ajustadas.

FIGURA 13 – CURVAS DE DESSORÇÃO E ADSORÇÃO OBTIDAS PELOS MODELOS AJUSTADOS



Fonte: o autor (2019).

Como verificado, os dois modelos possuem comportamento semelhante para os dois processos de sorção, principalmente para o primeiro período ( $\tau_1$ ), quando ajustados aos dados

obtidos em laboratório para as curvas de adsorção. Pode-se pressupor que ambos os modelos podem ser utilizados em condições meteorológicas em que o teor de umidade se altera numa base temporal inferior a  $\tau_1$ . Contudo, o modelo de Henderson e Pabis foi o mais adequado por apresentar maior valor de  $R^2$  e menor valor de EAM e REQM.

Em ambientes não controlados, para se comparar diferentes tempos de resposta, utiliza-se o primeiro período, pois os combustíveis constantemente estão se ajustando às mudanças nas condições meteorológicas (BAKŠIĆ; BAKŠIĆ; JAZBEC, 2017). No entanto, Lopes (2013) salienta que existem algumas condições em que o material combustível tem tempo suficiente para se estabilizar, sendo necessária a utilização do quarto período ( $\tau_4$ ). Os valores de  $\tau_1$  obtidos nas duas fases de sorção foram de 2,21 horas (dessorção) e 3,39 horas (adsorção) e estão acima dos encontrados por Anderson (1985) para *B. tectorum*. Entretanto, isso pode ser explicado pelos experimentos realizados por Britton *et al.* (1973) com grama tobosa (*Pleuraphis mutica* Buckley), os quais constataram que o vento exerce forte influência no tempo de resposta inicial. Outro fator de influência é o grau de desgaste avançado que o material combustível pode apresentar, fazendo com que o tempo de resposta seja mais rápido do que os combustíveis recém depositados no solo (ANDERSON, 1985).

Anderson (1990) estimou que as gramíneas possuem tempo de resposta de 0,85 hora e que o processo de dessorção e adsorção são similares. Wotton (2009), ao desenvolver o tempo de resposta para gramíneas ( $K_{GRASS}$ ), utilizou a mesma premissa e manteve os mesmos valores para os dois processos. Porém, para o ajuste do índice para a estepe foram utilizados os dois valores para cada processo conforme as equações  $K_d$  e  $K_w$ :

$$K_d = 0,330 * e^{0,0365T} * [0,424 * (1 - (H/100)^{1,7}) + 0,0694 * W^{0,5} * (1 - (H/100)^8)]$$

$$K_w = 0,241 * e^{0,0365T} * [0,424 * (1 - (H/100)^{1,7}) + 0,0694 * W^{0,5} * (1 - (H/100)^8)]$$

sendo:

$K_d$  e  $K_w$  = tempo de resposta;

$H$  = umidade relativa em %;

$T$  = temperatura em °C;

$W$  = velocidade do vento em km/h

$e$  = base dos logaritmos naturais (2,718282).

A TABELA 9 contém o resultado do teste SNK das três amostras analisadas para cada processo e as médias dos valores de umidade de equilíbrio de adsorção e dessorção.

TABELA 9 – VALORES MÉDIOS DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO

UR (%)	Umidade de equilíbrio (%)							
	Dessorção				Adsorção			
	1	2	3	Média	1	2	3	Média
30	10,09	9,42a	9,55a	<b>9,48</b>	8,56a	8,40	8,52a	<b>8,46</b>
40	11,67b	11,69b	12,13	<b>11,68</b>	11,32b	10,78	11,36b	<b>11,34</b>
50	13,26c	12,65	13,28c	<b>13,27</b>	12,49c	12,20	12,45c	<b>12,47</b>
60	15,90d	15,39	15,79d	<b>15,84</b>	14,11d	14,14d	14,28	<b>14,13</b>
70	18,92e	18,49	18,98e	<b>18,95</b>	17,55e	17,11e	15,77	<b>17,33</b>
80	21,94f	21,33	21,87f	<b>21,90</b>	19,08f	19,11f	19,67	<b>19,09</b>
90	26,13g	25,46	26,09g	<b>26,11</b>	23,18g	23,23g	26,09	<b>23,20</b>

NOTA: Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste SNK, considerando o nível de significância de 5%.

Fonte: o autor (2019).

Devido às limitações da câmara climática, os teores de umidade de equilíbrio para as faixas de umidade relativa 20 e 10% não foram determinados. Cronologicamente, trabalhos sobre a umidade de equilíbrio, tais como King e Linton (1963), Blackmarr (1971), Van Wagner (1972), Lopes *et al.* (2014) e Bakšić, Bakšić e Jazbec (2017) mostraram resultados similares aos obtidos neste trabalho. As medidas de adsorção diferiram significativamente das medidas de dessorção no total, bem como para os extremos das curvas. Os valores de p para os testes t pareados a 5% de significância foram  $p < 0,001$  para o total e nas faixas de umidade relativa de 90 e 30%.

As equações com os coeficientes obtidos para o PEVV que substituíram as originais do GMFC para a estimativa do teor de umidade de equilíbrio de dessorção e adsorção foram as seguintes:

$$EMC_D = \left( 1,01 * H^{0,637} + 13,12 * e^{\frac{H-100}{23,15}} \right) + 0,27(26,7 - T) * (1 - e^{-0,115 * H})$$

$$EMC_W = \left( 0,772 * H^{0,713} + 9,301 * e^{\frac{H-100}{11,988}} \right) + 0,27(26,7 - T) * (1 - e^{-0,115 * H})$$

sendo:

$EMC_D$  = umidade de equilíbrio de dessorção em %;

$EMC_W$  = umidade de equilíbrio de adsorção em %;

$H$  = umidade relativa em %;

$T$  = temperatura em °C;

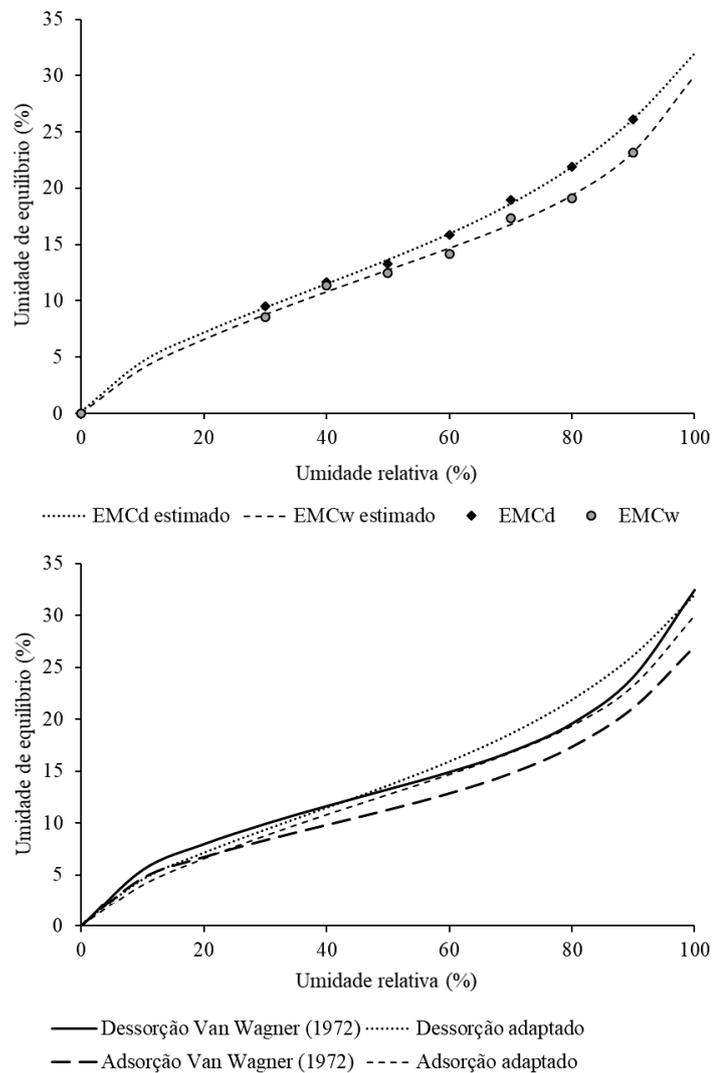
$e$  = base dos logaritmos naturais (2,718282).

A análise estatística mostrou que o resultado de  $R^2$  para o modelo de dessorção foi de 99,87% e para o de adsorção 99,71%, o que corrobora com os valores encontrados por Bakšić, Bakšić e Jazbec (2017) e Lopes (2013) ao ajustar os mesmos modelos para *Pinus halepensis* e

*Pinus pinaster*, respectivamente. O EAM obtido para a curva de adsorção foi de 0,29% e de 0,16% para dessorção, sendo abaixo dos valores encontrados para *P. halepensis*. Os valores de REQM para adsorção e dessorção foram 0,288 e 0,506, respectivamente, acima dos encontrados para o mesmo modelo por Lopes *et al.* (2014).

Os valores experimentais de umidade de equilíbrio de adsorção e dessorção obtidos para a estepe gramíneo-lenhosa do PEVV, bem como o modelo de Van Wagner (1987) ajustado, estão plotados na FIGURA 14.

FIGURA 14 – DADOS DE ADSORÇÃO E DESSORÇÃO PARA A ESTEPE DO PEVV



Fonte: o autor (2019).

É possível que as medidas de adsorção e dessorção apresentaram o comportamento esperado de uma curva em forma de sigmóide, para o qual se supõe que a EMC se aproxime de zero quando a UR se aproxima de zero. Outro fator observado foi a presença de uma histerese média de 1,32% entre as curvas de adsorção e dessorção. Para Van Wagner (1977), os valores

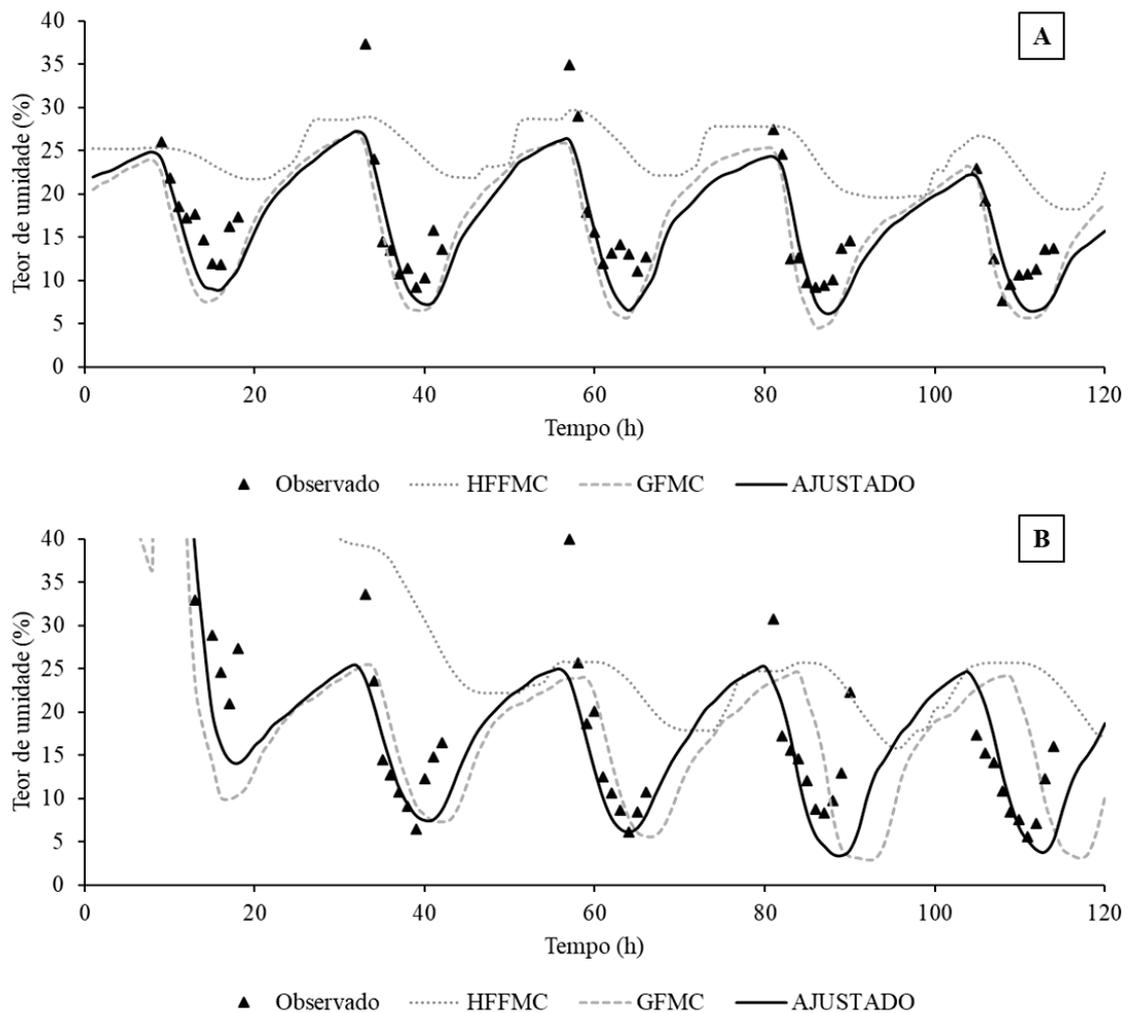
de adsorção são de 1 a 2% menores que os de dessorção, corroborando com a histerese média de 1,1% encontrada por Bakšić, Bakšić e Jazbec (2017).

Notou-se que o modelo ajustado para o PEVV, a partir dos 40% de umidade relativa fornece valores de umidade de equilíbrio mais altos do que o modelo original de Van Wagner. Isso ocorre porque o ajuste do modelo realizado com dados experimentais obtidos em condições ambientais específicas pode trazer resultados errôneos quando aplicados em locais com condições diversas (LOPES, 2013), por isso o ajuste é necessário.

### 5.2.2 Teor de umidade

Uma série temporal comparando as estimativas dos modelos HFFMC, GFMC e o ajustado para o PEVV, com o teor de umidade horário observado para julho e setembro, são apresentados na FIGURA 15.

FIGURA 15 – SÉRIE TEMPORAL DO TEOR DE UMIDADE OBSERVADO E ESTIMADOS PELO HFFMC, GFMC, E O MODELO AJUSTADO PARA JULHO (A) E SETEMBRO (B)

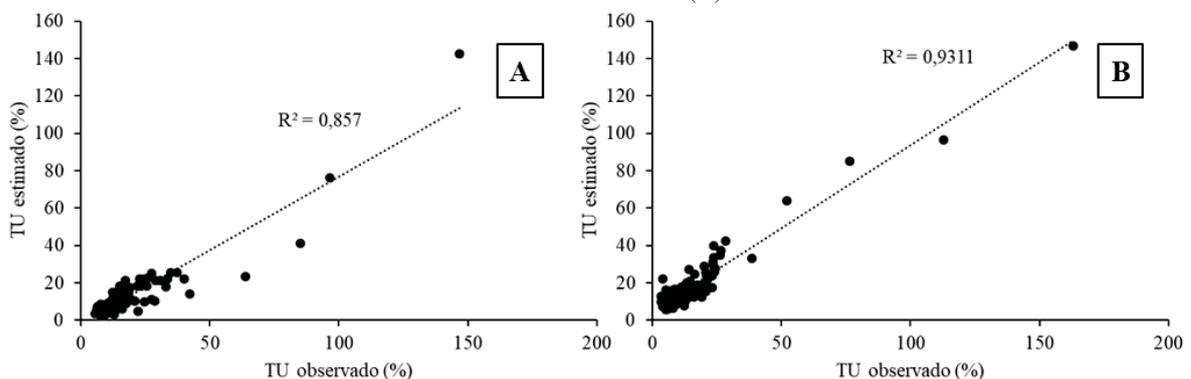


Fonte: o autor (2019).

O teor de umidade coletado variou de 5,6 a 146,7%, não ocorrendo precipitação durante o período de coletas. Todavia, valores acima da umidade de extinção ocorreram durante as coletas. Como os meses de julho e setembro compreendem o inverno, uma possível explicação é a ocorrência de orvalho, que, dependendo da duração e das condições de ocorrência, possui efeito igual ou até maior do que a chuva no ganho de umidade pelo material combustível (SIMARD, 1968a).

Pode-se observar que as estimativas de teor de umidade fornecidas pelo HFFMC foram superestimadas, comportamento encontrado por Slijepcevic e Anderson (2006) ao estimarem o teor de umidade para serapilheira de *Eucalyptus* sp. Outro fator que explica os valores elevados de teor de umidade é ausência da variável radiação solar nos cálculos do HFFMC, pois este foi desenvolvido para florestas de *Pinus ponderosa* Douglas ex Lawson e *Pinus banksiana* Lambert, que possuem secagem e umedecimento mais lentos (VAN WAGNER, 1987). Os valores estimados pelo GFMC e pelo modelo ajustado estão próximos dos obtidos em campo, porém ambos demonstram tendência de subestimar os valores no período mais quente do dia. Segundo Wotton (2009), essa tendência possivelmente está ligada a erros de estimativa da umidade de equilíbrio para esse período ou a erros nos modelos para a determinação da temperatura do combustível. Como a estimativa da temperatura do combustível é feita com base no modelo desenvolvido por Van Wagner (1969), e o ajuste de um novo modelo para a realidade do PEVV talvez resolva o problema da subestimação. A FIGURA 17 demonstra uma relação linear entre os teores de umidade observado e estimado.

FIGURA 16 – VALORES ESTIMADOS X OBSERVADOS DO GFMC ORIGINAL (A) E DO MODELO AJUSTADO (B)



Fonte: o autor (2019).

Através de uma análise de regressão linear foi possível constatar que o modelo ajustado para o PEVV apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) maior do que o do GFMC original, mostrando que 93,1% do teor de umidade pode ser explicado pelo teor de umidade estimado após o ajuste, valores superiores aos encontrados para os modelos testados por Alves

*et al.* (2009). Cruz *et al.* (2016), em estudo realizado nas savanas do leste australiano, encontraram para o GFMC original um erro absoluto médio de 3,42%, próximo ao valor encontrado para o modelo ajustado de 3,75%.

O teste de correlação de Pearson mostrou que o teor de umidade estimado pelo HFFMC possui um  $r = 0,82$  com o observado em campo, enquanto o GFMC possui um  $r = 0,93$  e o ajustado para o PEVV uma correlação de 0,96. Os três modelos obtiveram correlações mais altas com os dados coletados do que as obtidas por Wotton (2009) para a região de Echo Bay - Canadá, não obstante esses valores devem ser analisados com cautela, pois os pontos não são verdadeiramente independentes.

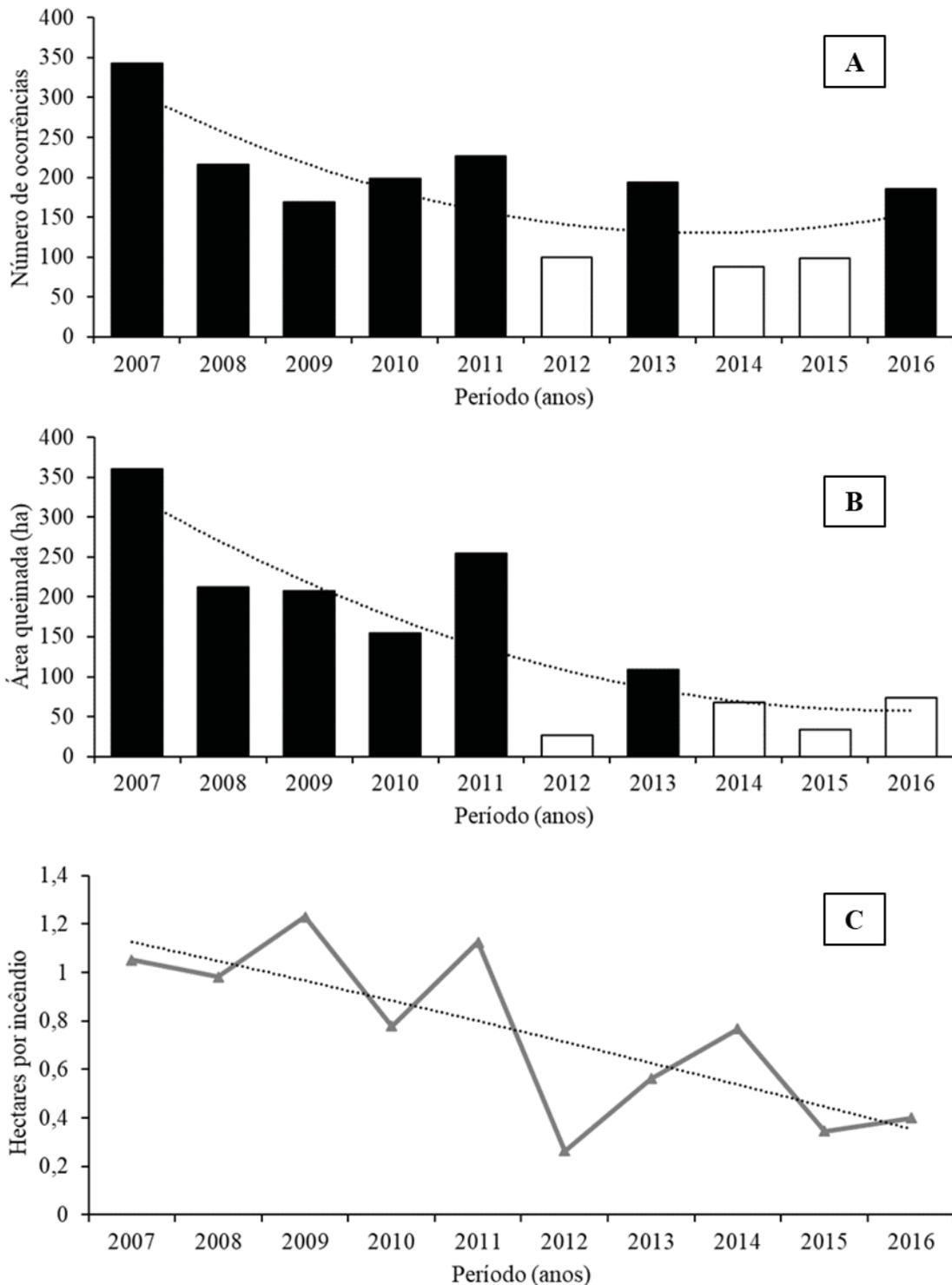
### 5.3 EFICIÊNCIA DOS ÍNDICES

#### 5.3.1 Análise do perfil de incêndios

De 2007 a 2017 foram registradas pelo Corpo de Bombeiros no município de Ponta Grossa, 1.815 ocorrências de incêndios, que atingiram 1.499,51 hectares. A frequência média de registros de incêndios foi de 181,5 incêndios por ano, abaixo dos 397,5 encontrados por Kovalsyki *et al.* (2014) para Ponta Grossa de 2006 a 2014 e acima dos valores encontrado por Santos *et al.* (2018) de 143,5 incêndios por ano para a região de Londrina, Brasil de 2005 a 2014.

As FIGURAS 17A e 17B apresentam a distribuição das ocorrências ao longo do período analisado, a distribuição de área queimada, com os valores abaixo (em branco) e acima (em preto) da média, juntamente com a linha de tendência obtida pela equação polinomial. A FIGURA 17C mostra as médias de área queimada por incêndio.

FIGURA 17 – (A) DISTRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE OCORRÊNCIAS POR ANO, (B) DISTRIBUIÇÃO DA ÁREA QUEIMADA POR ANO E (C) MÉDIA DA ÁREA QUEIMADA POR INCÊNDIO POR ANO PARA O MUNICÍPIO DE PONTA GROSSA



Fonte: o autor (2019).

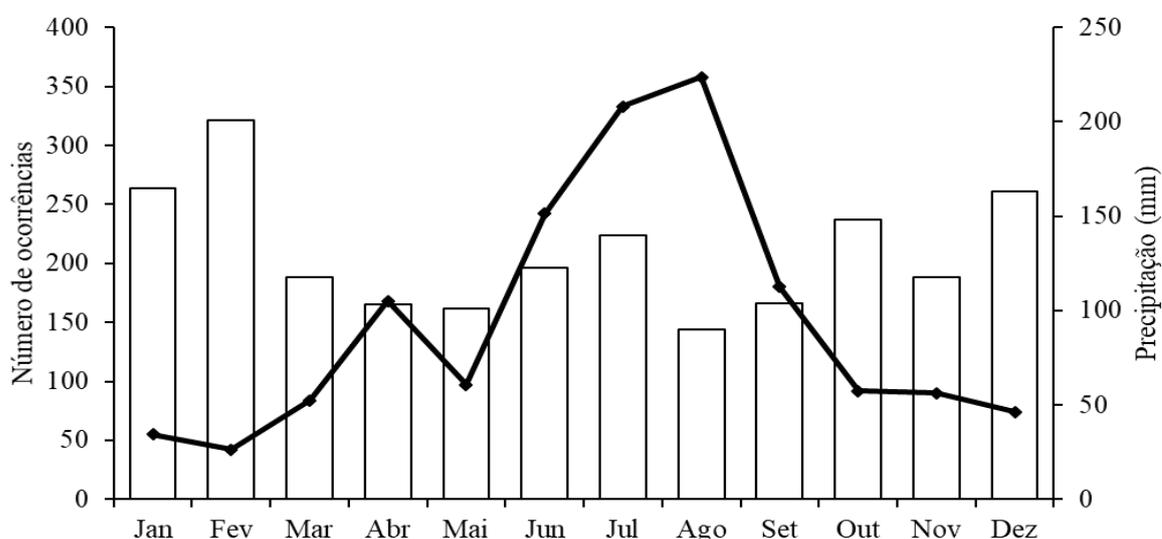
Observa-se uma tendência de decréscimo do número de ocorrências de 2007 a 2012, voltando a subir em 2014. O ano de 2007 apresentou ocorrências acima da média, resultado semelhante ao encontrado por Santos *et al.* (2018) para a região de Londrina e Tetto, Batista e

Soares (2012) ao estudar o perfil dos incêndios florestais para o estado do Paraná para o mesmo ano. Apenas os anos de 2012, 2014 e 2015 apresentaram número de ocorrências abaixo da média.

A média anual de área queimada foi de 149,95 ha, menor que os 388,09 ha queimados encontrados por Rodríguez *et al.* (2013) para Monte Alegre, local a aproximadamente 160 km da área estudada. Os anos de 2007 a 2011 apresentaram valores acima da média, assim como o ano de 2013, entretanto, notou-se uma tendência de redução da área queimada. Tetto *et al.* (2015), encontraram o mesmo comportamento para a mesma região, indicando que houve melhora no sistema de proteção contra incêndios florestais. Outra possibilidade é a melhoria na eficiência da detecção e combate aos incêndios, pois a média de área queimada por incêndio foi de 0,78 ha por incêndio para o período, sendo observada uma tendência de queda ao longo do período estudado.

A distribuição da precipitação média e a porcentagem de ocorrências por mês para o período estudado são apresentados na FIGURA 18.

FIGURA 18 – DISTRIBUIÇÃO DA PRECIPITAÇÃO MÉDIA POR MÊS E PORCENTAGEM DE OCORRÊNCIAS DE INCÊNDIOS



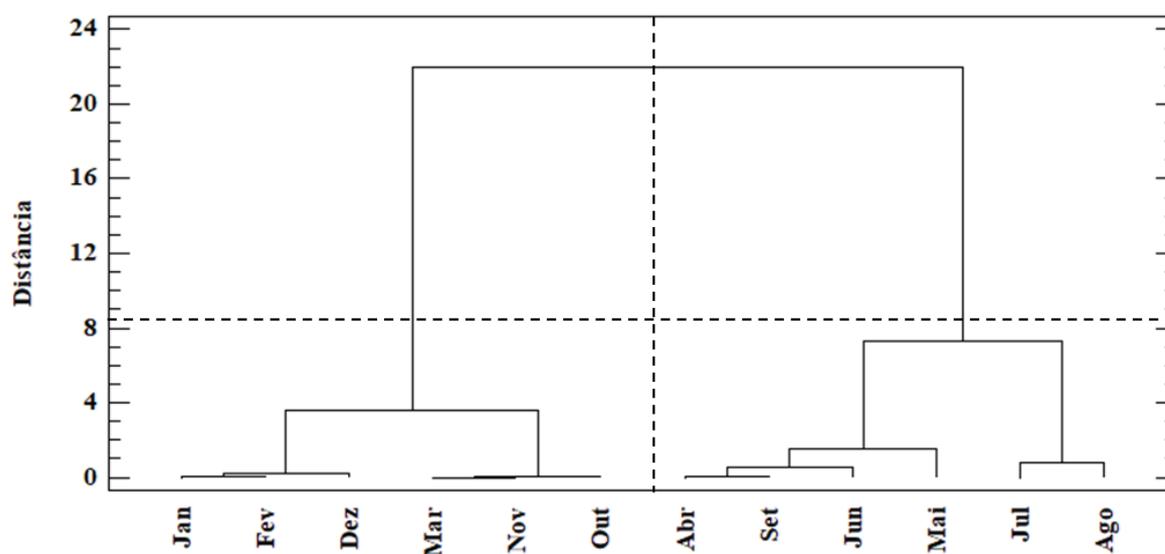
Fonte: o autor (2019).

Observou-se que o mês de agosto apresentou em média 7,2 dias de chuva com precipitação média de 90 mm, sendo o mês com menor precipitação e maior número de ocorrências (19,7%) no período analisado. A umidade dos combustíveis é o fator que regula a probabilidade de ignição e seu ganho ocorre, além das interações com o vapor de umidade presente no ambiente, com a ocorrência de precipitação (FULLER, 1991; SIMARD, 1968a). Segundo Tetto,

Batista e Soares (2012), as ocorrências de incêndio possuem maior correlação com a precipitação do que a área afetada. Nesse trabalho, encontrou-se uma correlação inversa entre o número de ocorrências e dias com chuva, como comprovado por Sampaio (1999). Observou-se, para a área de estudo, uma correlação inversa entre o número de ocorrências e dias de chuva de 79 e de 51% quando relacionado somente com a precipitação. Estes valores são maiores do que os encontrados por Torres *et al.* (2011). A partir destes resultados foi possível determinar o período ao longo do ano com maior incidência de incêndios.

A estação de incêndios foi determinada a partir de uma análise de conglomerados, conforme o dendrograma representado na FIGURA 19.

FIGURA 19 – DENDROGRAMA RELACIONANDO DIAS COM CHUVA E NÚMERO DE OCORRÊNCIAS DE INCÊNDIOS



Fonte: o autor (2019).

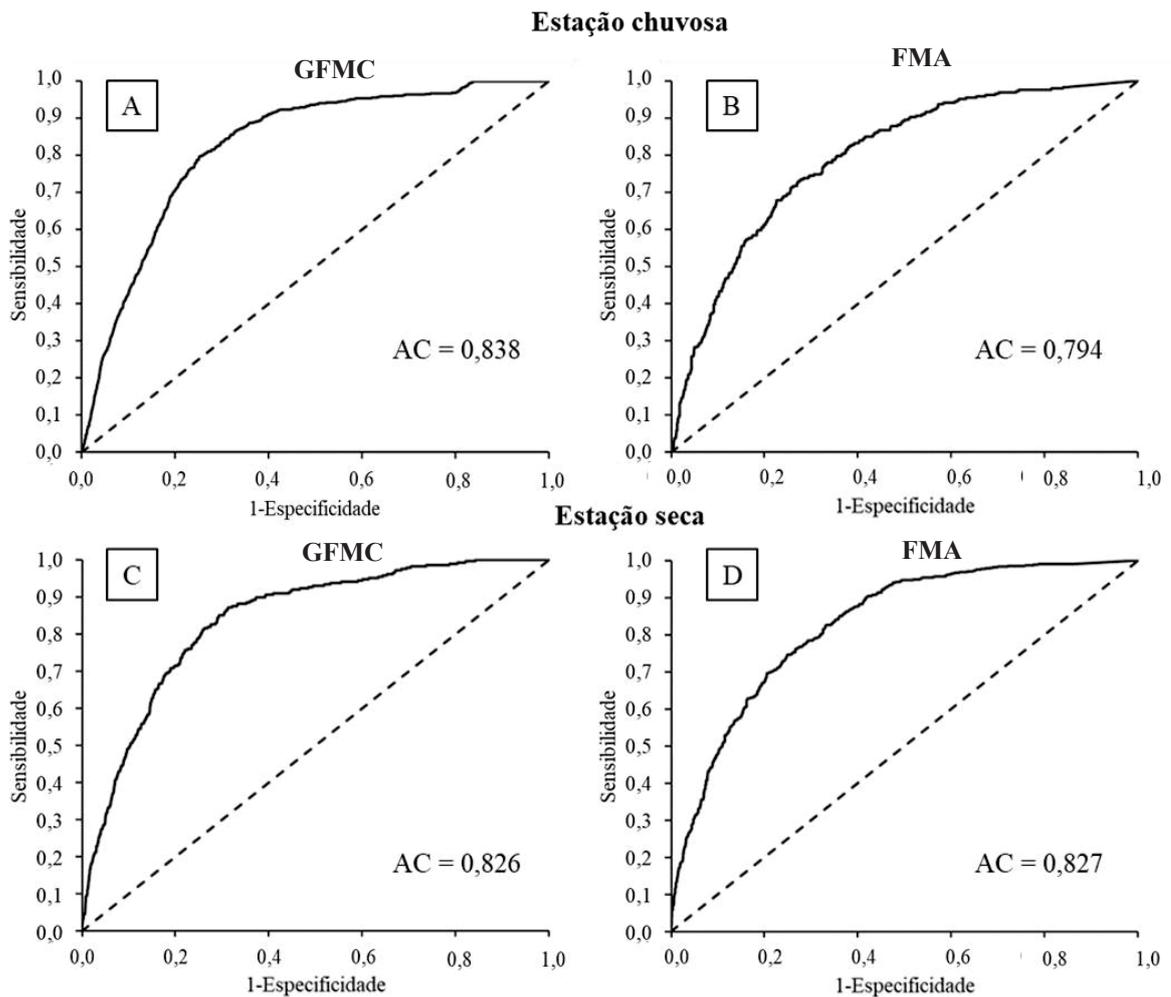
A linha tracejada, obtida pelo coeficiente de fusão, indica o local ideal para a determinação do agrupamento de meses com características semelhantes de precipitação e número de ocorrências. A estação com maior incidência de incêndios florestais, concentrando 75,9% das ocorrências, se deu nos meses de abril a setembro, enquanto de outubro a março o período mais úmido, apenas 24,1% das ocorrências foram registradas. Kovalsky (2016) encontrou os mesmos períodos para a região de Ponta Grossa. Tetto, Batista e Soares (2012) constataram que o período com maior porcentagem de ocorrências de incêndios para o estado do Paraná é entre julho e setembro, com pico no mês de agosto; observaram também que a maior área afetada ocorre no mês de setembro. As estações com maior propensão a ocorrência de incêndios flores-

tais no Paraná compreendem outono, inverno e primavera, período associado à baixa precipitação e ocorrências de geadas, que reduzem o teor de umidade do material combustível (DEPPE *et al.*, 2004).

### 5.3.2 Análise da eficiência dos índices

Foram analisados 3.835 dias, com 901 dias com ocorrência de incêndios, e a estação de maior incidência compreendendo um período de 1830 dias, com 613 dias de ocorrência. Para a estação mais úmida foram analisados 2005 dias, com 288 dias de ocorrências. A FIGURA 20 apresenta as análises da área sob a curva (AC), juntamente com a curva de Característica de Operação do Receptor (COR), para as escalas do GFMC ajustado e FMA calculados para ambas as estações.

FIGURA 20 – CURVA DE CARACTERÍSTICA DO RECEPTOR E ÁREA SOB A CURVA PARA GFMC AJUSTADO PARA ESTAÇÃO ÚMIDA (A); FMA PARA ESTAÇÃO ÚMIDA (B); GFMC AJUSTADO ESTAÇÃO SECA (C); FMA PARA ESTAÇÃO SECA (D).



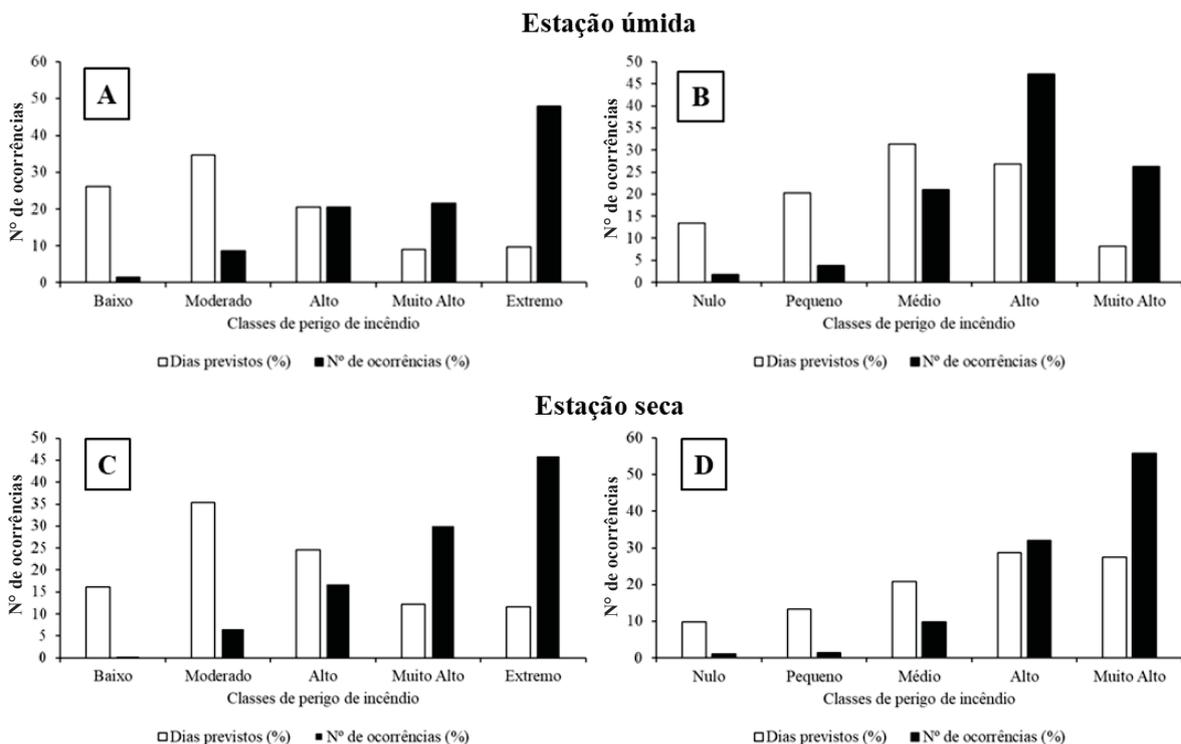
Fonte: o autor (2019).

Observou-se que a escala do GFMC ajustado para o PEVV possui uma precisão muito boa na estimativa do perigo tanto na estação úmida (FIGURA 20A), com 0,838 de AC, como na seca com 0,827 (FIGURA 20C). O FMA demonstrou boa precisão apenas na estação seca, com AC de 0,827 (FIGURAS 20B) enquanto para a estação úmida 0,794 (FIGURA 20D). Os resultados alcançados para o PEVV são superiores aos encontrados por White *et al.* (2013) ao calcular o FWI e o FMA, com valores de AC de 0,761 e 0,756, respectivamente, para o litoral norte da Bahia.

Exceto pelo desempenho da FMA no período úmido, os dois índices apresentaram uma previsão muito boa para a região de estudo. Os resultados fornecidos pela curva COR são consistentes, pois independem da calibração dos índices em relação às ocorrências (TOTH *et al.*, 2003). Outro fator a ser observado é a assimetria da curva COR, esta quanto mais próxima de uma sensibilidade de valor 1, menos alarmes falsos serão detectados na previsão, comportamento esse observado nos dois índices (WILKS, 2011).

A FIGURA 21 apresenta a distribuição da frequência relativa dos dias previstos para cada classe de perigo e do número de ocorrências para cada classe para a estação úmida e seca conforme suas escalas originais.

FIGURA 21 – NÚMERO DE DIAS PREVISTOS E DIAS DE OCORRÊNCIAS DE INCÊNDIOS POR CLASSE DE PERIGO: GFMC ADAPTADO (A) E (C) E FMA (B) E (D)



Fonte: o autor (2019).

A FMA calculada para a estação úmida (FIGURA 21B) apresentou um comportamento de concentração dos dias previstos na classe de perigo “Médio” com 31,4% decrescendo para as classes extremas, comportamento não repetido para a estação de seca (FIGURA 21D). A distribuição do número de ocorrências apresentou comportamento crescente nas duas estações estudadas, com 94,4% das ocorrências entre as classes “Médio” e “Muito alto” para a estação úmida e 97,7% para estação seca. Kovalsyki *et al.* (2014), ao avaliarem o desempenho da FMA para o município de Ponta Grossa, encontraram distribuição semelhante à obtida com os limites de classe originais para a estação úmida. De acordo com Tetto (2012), um índice está devidamente ajustado quando o maior número de dias previstos é agrupado na classe de perigo “Médio”, decrescendo para as classes “Nulo” e “Muito alto”. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de a FMA ter sido desenvolvida para a região central do estado do Paraná, com clima subtropical úmido transicional (Cfa/Cfb), segundo a classificação de Köppen (ALVARES *et al.*, 2013). A letra C na classificação de Köppen indica um clima temperado chuvoso, uma possibilidade que pode explicar a simetria presente na distribuição de frequências. Para a estação de seca, a FMA apresentou apenas a distribuição do número de ocorrências por classe de perigo dentro das premissas citadas. Em ambas as estações se fez necessário o ajuste de classes.

O GFMC adaptado, mesmo com seus limites de classe originais demonstrou uma distribuição de frequências dos dias previstos decrescente da classe de perigo “Baixo” para “Extremo” para a estação úmida (FIGURA 21A), mesmo comportamento observado para a estação seca (FIGURA 21B). Porém, ainda não poderia ser considerada uma distribuição ideal, pois a classe de perigo “Moderado” concentrou 35,4 e 34,7% dos dias previstos para a estação úmida e seca respectivamente, enquanto a classe “Baixo” apresentou 26,2 e 16,2% para cada estação. O número de ocorrências apresentou comportamento crescente com 89,9 (estação úmida) e 93,0% (estação seca) das ocorrências dentro das classes “Alto”, “Muito alto” e “Extremo”. Todavia, vale ressaltar que Turner (1972) encontrou resultados semelhantes ao calcular o FWI para a Columbia Britânica no Canadá, obtendo uma frequência de dias na classe de perigo “Baixo” de 23%, “Moderado” de 32%, “Alto” de 25%, “Muito alto” de 15% e para a classe “Extremo” 5%. Segundo o autor, a frequência de dias previstos para classe “Baixo” ocorre em média em 25% do tempo, enquanto a classe “Extremo” apresenta 5%.

A TABELA 10 apresenta as variáveis para determinação da eficiência calculadas para as escalas originais dos índices.

TABELA 10 - VARIÁVEIS DE EFICIÊNCIA PARA A ESCALA ORIGINAL

Variável	GFMC		FMA	
	Estação úmida	Estação seca	Estação úmida	Estação seca
<b>SS</b>	0,34	0,60	0,27	0,44
<b>PS (%)</b>	72,4	80,4	68,8	72,0
<b>POD (%)</b>	89,9	93,0	76,9	82,6
<b>POFD (%)</b>	30,6	26,0	32,7	33,3

Nota: SS = *skill score*; PS = porcentagem de sucesso; POD = probabilidade de detecção; POFD = probabilidade de falsa detecção.

Fonte: o autor (2019).

Após a análise da eficiência observou-se que o GFMC adaptado possui desempenho melhor do que a FMA em ambas as estações. A separação do período analisado em duas estações melhorou, para a FMA, os valores de *skill score* (SS) com 0,27 e 0,44 e porcentagem de sucesso (PS) de 68,8 e 72,0% se comparados com os 0,22 e 54,2% obtidos por Kovalsyki (2016) para o município de Ponta Grossa. Pode-se notar que a FMA possui uma probabilidade de detecção (POD) de 76,9% para a estação úmida e 82,6% para a estação seca, contudo possui uma probabilidade de falsa detecção (POFD) de 32,7% e 33,3%, isto é, cerca de 30% dos eventos previstos como ocorrência foram alarmes falsos.

Ainda que a distribuição do GFMC adaptado com a escala original esteja dentro das premissas citadas e o valor limiar de 84 (limite superior da classe de perigo “Moderado”) forneceu 89,9% e 93% das previsões de ocorrência de incêndios corretamente estimadas, o índice ainda possui uma taxa de falsos alarmes de 30,6% para a estação úmida e 26% para a estação seca. A PS para as estações úmida e seca indicaram que 72,4 e 80,4% foram corretas. Resultados superiores aos obtidos por Torres *et al.* (2017) para o FWI calculado para o município de Viçosa, Minas Gerais. Destaque para o SS de 0,6 obtido para a estação seca.

O uso de um índice de perigo desajustado pode levar à tomada de decisões equivocadas em relação aos procedimentos de prevenção e combate aos incêndios florestais (Nunes *et al.*, 2010; Tetto *et al.*, 2010). Segundo Soares, Batista e Tetto (2017), um índice de perigo de incêndios ajustado permite cumprir os objetivos no planejamento de prevenção a custos razoáveis. Silva (2017) acrescenta que os custos de combate podem ser 110% maiores do que os custos para prevenção.

Para adequar um índice de perigo a uma determinada região pode-se utilizar a mesma equação e adaptar somente a escala de perigo, sendo a responsabilidade do ajuste do gestor florestal responsável pelo planejamento da prevenção e combate de incêndios (SOARES; BATISTA; TETTO, 2017; DEEMING, 1983). A TABELA 11 apresenta os novos limites de classe de perigo determinados para o PEVV.

TABELA 11 – NOVOS LIMITES DE CLASSE OBTIDOS PARA O GFMC ADAPTADO E PARA A FMA

Classe de perigo	Valor do GFMC	Valor da FMA	Classe de perigo
<b>Estação úmida</b>			
Baixo	$\leq 81,0$	$\leq 4,0$	Nulo
Moderado	81,1 a 86*	4,1 a 8,0*	Pequeno
Alto	86,1 a 89	8,1 a 12,0	Médio
Muito alto	89,1 a 93	12,1 a 19,0	Alto
Extremo	$>93$	$>19,0$	Muito alto
<b>Estação seca</b>			
Baixo	$\leq 82,0$	$\leq 6,0$	Nulo
Moderado	82,1 a 87*	6,1 a 13,0*	Pequeno
Alto	87,1 a 89	13,1 a 21,0	Médio
Muito alto	89,1 a 92	21,1 a 34,0	Alto
Extremo	$>92$	$>34,0$	Muito alto

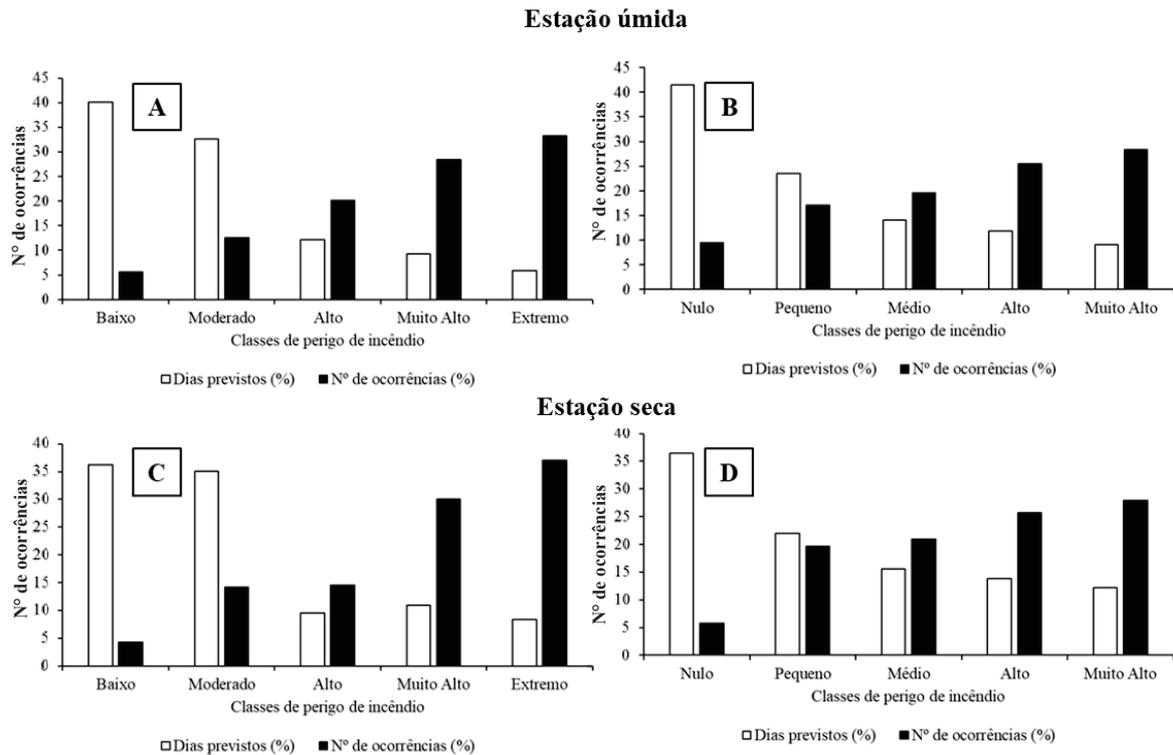
NOTA: valor limiar determinado pelo índice de união (IU) (\*).

FONTE: O autor (2019).

O valor limiar determinado pelo índice de união é o valor de corte ótimo para a previsão de ocorrência ou não ocorrência de incêndios. Por meio desse valor buscou-se obter um valor de POD de 100% e de POFD de 0% (WILKS, 2011). Esse limiar pode ser considerado o ponto que representa o teor de umidade de extinção, ou seja, para valores acima desse teor de umidade a probabilidade de ignição é zero (CHUVIECO; AGUADO; DIMITRAKOPOULUS, 2004). Como o GFMC é um índice baseado na estimativa do teor de umidade do material combustível, o teor de umidade de extinção para os valores 86 e 87 foram de 18,2 e 16,9%, respectivamente. Todavia, para a determinação da umidade de extinção seriam necessários experimentos em laboratório.

A FIGURA 22 apresenta a distribuição da quantidade de dias e número de ocorrências por classe para o período de ajuste com base no novo valor limiar.

FIGURA 22 – NÚMERO DE DIAS PREVISTOS E DIAS DE OCORRÊNCIAS POR CLASSE DE PERIGO AJUSTADAS PARA O GFMC ADAPTADO (A) E (C) E FMA (B) E (D)



Após o ajuste de classes, tanto GFMC adaptado (FIGURAS 22A e 22C) quanto a FMA (FIGURAS 22B e 22D) apresentaram o comportamento esperado pela premissa estabelecida por Nunes *et al.* (2010), uma vez que o número de dias em cada classe teve um comportamento crescente. Turner (1972) afirmou que a distribuição de frequência de dias previstos por classe de perigo varia de região para região e de estação para estação. Nesse trabalho pode-se constatar que a classe “Baixo” apresentou 40,1% dos dias previstos para estação úmida e 36,3% dos dias previstos para a estação seca, decrescendo até 5,8 (estação seca) e 8,34% (estação úmida) para a classe “Extremo”.

A distribuição da frequência de dias previstos para a FMA apresentou o mesmo comportamento da premissa após o ajuste. A classe de perigo “Nulo” concentrou 41,5% dos dias previstos para a estação úmida e 36,4% para a estação seca, enquanto a classe “Muito alto” concentrou 9 e 12,24% dos dias para a estação úmida e seca, respectivamente.

Ainda que Wendling *et al.* (2012) também afirmem que a distribuição ideal da quantidade de dias por classe de perigo deve seguir uma distribuição normal, Viegas *et al.* (2004) apontaram que a quantidade de dias esperada na classe “muito alto” não deve exceder 5%.

Alexander (2008) ao revisar as classes do FWI para a região de savana na Nova Zelândia, relatou que as classes de perigo “Baixo”, “Moderado”, “Alto” e “Extremo” devem seguir a distribuição de frequência decrescente de 45%, 30%, 20% e 5%, respectivamente.

Além da premissa anteriormente citada, pode-se ainda analisar uma segunda, também estabelecida por Nunes *et al.* (2010), a qual determina que a distribuição de ocorrências de incêndios pelas classes de perigo de incêndios deva ter comportamento crescente. Viegas *et al.* (2004) acrescentaram que o número de ocorrências da classe “Nulo” se limita a um. Tetto *et al.* (2010) realizaram mesmo procedimento para o ajuste dos valores das classes de perigo da FMA e consideraram as seguintes condicionantes: i) minimizar o número de dias no período, nas classes de perigo “Alto” e “Muito alto”; e ii) maximizar a correlação entre a ocorrência de incêndios e as classes “Alto” e “Muito alto”. Esse comportamento foi observado no presente estudo com as classes de perigo do GFMC adaptado de “Alto” a “Extremo”, concentrando 81,9 e 81,6% das ocorrências para a estação seca e úmida, bem como a FMA com aproximadamente 73,4 e 74,6% das ocorrências nas classes “Médio”, “Alto” e “Muito alto”.

Tendo em vista que a distribuição desejada foi alcançada para os dois índices, a TABELA 12 mostra os resultados dos cálculos de desempenho do GFMC adaptado e da FMA ajustada.

TABELA 12 – VARIÁVEIS DE DESEMPENHO PARA OS ÍNDICES AJUSTADOS

Variável	GFMC		FMA	
	Estação úmida	Estação seca	Estação úmida	Estação seca
SS	0,46	0,82	0,30	0,47
PS (%)	81,9	92,5	72,4	74,7
POD (%)	81,9	81,6	73,4	74,6
POFD (%)	18,2	2,1	27,8	25,2

Nota: SS = *skill score*; PS = porcentagem de sucesso; POD = probabilidade de detecção; POFD = probabilidade de falsa detecção.

Fonte: o autor (2019).

O ajuste por meio da determinação do valor limiar melhorou as variáveis de eficiência dos dois índices. A FMA apresentou melhoras na PS para estação úmida com 72,4% e uma redução na POD para a estação seca para 74,6%. Entretanto, apresentou valores de 27,8% de alarmes falsos para a estação úmida e 25,2 % para a estação seca. O SS apresentou uma melhora para as estações úmida e seca com 0,30 e 0,47. Resultados superiores aos encontrados por Nunes *et al.* (2010) (PS: 34,32%; SS:0,0517), Borges *et al.* (2017) (PS:38,54%; SS:0,0946) e White, Ribeiro e Souza (2015) (PS: 20%; SS:0,02) e Mbanze *et al.* (2017) (PS: 35,6%; SS: 0,08), esses autores classificaram como não satisfatório o desempenho do índice. Contudo o GFMC adaptado apresentou melhor eficiência na predição das ocorrências de incêndio para esse estudo.

Van Wagner (1987) e Turner (1972) afirmam que o FWI deve ser calculado apenas para a temporada de incêndios, isso explica o melhor desempenho obtido pelo índice durante a estação seca. Outra explicação é a falta da utilização da variação da carga de material combustível ao longo do ano, pois essa variável está diretamente ligada à absorção de umidade provinda da precipitação pluviométrica (WOTTON, 2009). O GFMC adaptado apresentou um valor de SS de 0,46 para a estação úmida, sendo inferior ao valor de 0,53 obtido por Torres *et al.* (2017) para o Telicyn e semelhante ao SS apresentado pelo EVAP/P. Cabe salientar que apesar do GFMC apresentar valores de POFD de 18,2%, sua PS foi de 81,9, acima do valor de 71% obtido por Sampaio (1999).

White *et al.* (2013) ao analisarem o desempenho do FWI, obtiveram valores de SS de 0,053 e PS de 52,8%, e nesse mesmo estudo encontraram um SS de 0,38 e uma PS de 66,5% para um modelo logístico ajustado para o litoral norte do estado da Bahia. Contudo, o GFMC apresentou melhor desempenho na predição do perigo de incêndios florestais para a estação seca, período de maior incidência de incêndios para o PEVV.

A porcentagem de sucesso indica que o GFMC adaptado acertou 92,5% de suas estimativas de ocorrência ou não ocorrência de incêndios, sendo que 81,6% das predições que indicam que ocorrerá incêndios foram corretas e 2,1% foram consideradas alarme falso. O valor obtido de 0,82 de *Skill Score* indica um bom desempenho do GFMC adaptado na predição de ocorrências de incêndios.

O GFMC adaptado para a estação seca do Parque Estadual de Vila Velha apresentou variáveis de desempenho superiores aos das literaturas supracitadas, demonstrando que o GFMC possui robustez em suas estimativas. Wendling *et al.* (2012) recomendam que o índice seja ajustado periodicamente, pois a distribuição da frequência de ocorrências de incêndios pode variar com o tempo.

## 6 CONCLUSÕES

Mediante os resultados obtidos conclui-se que o GFMC é um método adequado para a estimativa do teor de umidade do material combustível para a estepe do Parque Estadual de Vila Velha. Os modelos para as estimativas de umidade de equilíbrio e do tempo de resposta escolhidos demonstraram-se bem ajustados aos dados obtidos nas coletas realizadas em campo e nos experimentos realizados em laboratório.

As estimativas do teor de umidade apresentaram uma tendência de subestimação com relação aos dados observados em campo. Contudo, o modelo apresentou bom desempenho nas predições conforme resultados apresentados pelos parâmetros estatísticos utilizados, sendo adequado para esse fim.

A análise do perfil de incêndios permitiu a delimitação da estação de maior incidência de incêndios, mostrando que o número de ocorrências possui correlação inversa com a precipitação. Observou-se que a área queimada, bem como a área queimada por um incêndio apresentaram tendência de queda no período analisado.

O método do índice de união mostrou-se eficiente na determinação de um valor limiar para otimizar as predições. A utilização das variáveis de probabilidade de detecção e probabilidade de falsa detecção forneceram informações mais específicas com relação ao número de ocorrências corretamente previstas.

O GFMC adaptado calculado sem ajuste de classes apresentou desempenho superior a FMA original. O GFMC adaptado ajustado para a estação seca apresentou os melhores resultados se comparado a FMA ajustada para a estação seca e úmida e o GFMC ajustado para a estação úmida.

Como o *Grass Fuel Moisture Code* apresentou melhor eficiência do que a FMA após o ajuste dos modelos para a estimativa do teor de umidade e após o ajuste de classes perigo. Portanto, recomenda-se o uso do índice para a região estudada, conforme as variáveis de avaliação de desempenho utilizadas,

## REFERÊNCIAS

- ALEXANDER, M. E. **Proposed revision of fire danger class criteria for forest and rural areas in New Zealand**. 2nd Edition. National Rural Fire Authority, Wellington, in association with Scion, Rural Fire Research Group, Christchurch. 62 p., 2008.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711 – 728, 2013.
- ALVES, M. V. G.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V.; OTTAVIANO, M.; MARCHETTI, M. Fuel moisture sampling and modeling in *Pinus elliottii* Engelm. plantations based on weather conditions in Paraná - Brazil. **iForest**, Viterbo, v. 2, n.1, p. 99 - 103, 2009.
- ANDERSON, H. E. Moisture and fine forest fuel response. In: **Proceedings of the 8th Conference on Fire and Forest Meteorology**. 1985. p. 192-199.
- ANDERSON, H. E. **Predicting equilibrium moisture content of some foliar forest litter in the northern Rocky Mountains**. USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, 1990. (Research Paper INTa429)
- ANDERSON, H. E.; SCHUETTE, R. D.; MUTCH, R.W. **Timelag and equilibrium moisture content of Ponderosa pine needles**. USDA Forest Service, Inter mountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, 1978. (Research Paper INTa202)
- ANDREWS, P. L. Current status and future needs of the BehavePlus Fire Modeling System. **International Journal of Wildland Fire**, Washington DC, v. 23, n. 1, p. 21 - 23, 2014.
- BAKŠIĆ, N.; BAKŠIĆ, D.; JAZBEC, A. Hourly fine fuel moisture model for *Pinus halepensis* (Mill.) litter. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 243, n. 1, p. 93 - 99, 2017.
- BATISTA, A. C. Mapas de risco: uma alternativa para o planejamento de controle de incêndios florestais. **Floresta**, Curitiba, v. 30, n. 1, p. 45 - 54, 2000.
- BATISTA, A. C.; OLIVEIRA, D. dos S.; SOARES, R. V. **Zoneamento de risco de incêndios florestais para o estado do Paraná**. Curitiba: FUPEF, 2002. 86 p.
- BAUMGARTNER, A.; ENDERS, G.; KIRCHNER, M.; MAYER, H. Global climatology. In: PLATE, E. J., editor. **Engineering meteorology**. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing, 1982.
- BIANCHI, L. O.; DEFOSSÉ, G. E. Ignition probability of fine dead surface fuels in native Patagonian forests of Argentina. **Forest Systems**, Madri, v. 24, n. 1, p. 129 – 138, 2013.
- BEUTLING, A.; BATISTA, A. C.; STOLLE, L.; TETTO, A. F.; ALVES, M. V. G. Caracterização e modelagem de material combustível superficial em povoamentos de *Pinus elliottii*. **Floresta**, Curitiba, v. 1, n. 3, p. 443 - 452, 2012.
- BLACKMARR, W. H. **Equilibrium moisture content of common fine fuels found in southeastern forests**. United States Department of Agriculture. Forest Service. (Research Paper SE-74).

BORGES, T. S., FIEDLER, N. C., SANTOS, A. R., LOUREIRO, E. B., MAFIA, R. G. Desempenho de alguns índices de risco de incêndios em plantios de eucalipto no norte do Espírito Santo. **Floresta e Ambiente**, v. 37, n. 92, p. 535 - 543, 2017.

BOWMAN D. M.; BALCH J. K.; ARTAXO P.; BOND W. J.; CARLSON J. M.; COCHRANE M. A.; D'ANTONIO C. M.; DEFRIES R. S.; DOYLE J. C.; HARRISON S. P.; JOHNSTON F. H.; KEELEY J. E.; KRAWCHUK M. A.; KULL C. A.; MARSTON J. B.; MORITZ M. A.; PRENTICE I. C.; ROOS C. I.; SCOTT A. C.; SWETNAM T. W.; VAN DER WERF G. R.; PYNE S. J. Fire in the Earth system. **Science**, Washington, v. 324, p. 481 – 484, 2009.

BOWMAN D. M.; BALCH J. K.; ARTAXO P.; BOND W. J.; CARLSON J. M.; COCHRANE M. A.; D'ANTONIO C. M.; DEFRIES R. S.; JOHNSTON F. H.; KEELEY J. E.; KRAWCHUK M. A.; KULL C. A.; MACK, M.; MORITZ M. A.; PYNE, S.; ROOS C. I.; SCOTT A. C.; SODHI, N. S.; SWETNAM T. W. The human dimension of fire regimes on Earth. **Journal of Biogeography**, v. 38, n. 8, p. 2223 - 2236, 2011.

BRITTON, C. M.; COUNTRYMAN, C. M.; WRGHT, H. A.; WALVEKAR, A. G. The effect of humidity air temperature and wind speed on fine fuel moisture content. **Fire Technology**, v. 9, p. 46–55, 1973.

BROWN, A. A.; DAVIS, K. P. **Forest fire: control and use**. 2.ed. New York: McGraw Hill, 1973. 686 p.

BYRAM, G. M. **An analysis of the drying process in forest fuel material**. US Forest Service. Fort Collins: 1963. 56 p. (Technical Report SRS-200).

BYRAM, G. M. Combustion of forest fuels. In: DAVIS, K. P. **Forest fire: control and use**. New York: Mc Graw Hill, 1959.

CHENEY, N. P.; SULLIVAN, A. **Grassfires: fuel, weather and fire behavior**. Melbourne: CSIRO, 2008.

CHUVIECO, E.; AGUADO, I.; DIMITRAKOPOULOS, A. P. Conversion of fuel moisture values to ignition potential for integrated fire danger assessment conversion. **Canadian Journal of Forest Research**, Quebec, v. 34. p. 2284 – 2293, 2004.

CORPO DE BOMBEIROS DA POLÍCIA MILITAR DO PARANÁ. **SYSBM - CCB Cascavel**: registro de ocorrência de incêndios 2007 – 2016. Disponível em: <<http://www.bombeiroscascavel.com.br/registrocdb/imprensa.php>>. Acesso em: 14 out. 2019.

CRUZ, M. G.; KIDNIE, S.; MATTHEWS, S.; HURLEY, R. J.; SLIJEPCEVIC, A.; NICHOLS, D.; GOULD, J. S. Evaluation of the predictive capacity of dead fuel moisture models for Eastern Australia grasslands. **International journal of wildland fire**, Washington DC, v. 25, n. 9, p. 995 - 1001, 2016.

DE JONG, M.C; WOOSTER, M.J.; KITCHEN, K.; MANLEY, C.; GAZZARD, R.; MCCALL, F.F. Calibration and evaluation of the Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System for improved wildland fire danger rating in the United Kingdom. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci**, v. 16, n. 1, p. 1217 – 1237, 2016.

DEPPE, F.; PAULA, E. V.; MENEGHETTE, C. R.; VOSGERAU, J. Comparação dos índices de risco de incêndio florestal com focos de calor no estado do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 34, n. 2, p. 119 – 124, 2004.

DUANE, A.; PIQUÉ, M.; CASTELLNOU, M.; BROTONS, L. Predictive modelling of fire occurrences from different fire spread patterns in Mediterranean landscapes. **International journal of wildland fire**, Washington DC, v. 24, n. 3, p. 407 - 418, 2015.

ERBAY, Z.; ICIER, F. A review of thin layer drying of foods: Theory, modeling, and experimental results. **Critical reviews in food science and nutrition**. v. 50, n. 5, p. 441-464, 2010.

FIDELIS, A. T.; DELGADO-CARTAY, M. D.; BLANCO, C. C.; MULLER, S; C; PILLAR, V. D. P.; PFADENHAUER, J. S. Fire intensity and severity in Brazilian Campos grasslands. **Interciencia: revista de ciencia y tecnologia de américa**, Caracas. v. 35, n. 10, p. 739-745, 2010.

FIDELIS, A.; PIVELLO, V. R. Deve-se usar o fogo como instrumento de manejo no cerrado e campos sulinos? **Biodiversidade Brasileira**, v. 1, n. 2, p. 12 - 25, 2011.

FIMIA, J. C. M. Fatores meteorológicos. In: VÉLEZ, R. (Ed.). **La defensa contra incendios forestales: fundamentos y experiencias**. Madrid: Mcgraw-Hill; 2009.

FINNEY, M. **FARSITE: fire area simulator - model development and evaluation**. US Forest Service. Fort Collins: 2004. 52p. (Research Paper RMRS-RP-4 Revised).

FRANÇA, H. Os incendios de 2010 nos parques nacionais do Cerrado. **Universidade Federal do ABC: relatórios**, 2010. Disponível em: <<http://www.ufabc.e-du.br/images/stories/comunicacao/queimadas-2010-1.pdf>>. Acesso em: 18 ago 2019.

FULLER, M. **Forest fires: An introduction to wildland fire behavior, management, fire-fighting, and prevention**. Nova Iorque: Wiley Nature Editions, 1991.

HARDESTY, J.; MYERS, R. L.; FULKS W. Fire, ecosystems, and people: a preliminary assessment of fire as a global conservation issue. **The George Wright Forum**, Hancock, v. 22, n. 4, p. 78-87, 2005.

HEIKKILÄ, T. V.; GRÖNQVST, R.; JURVÉLIUS, J. **Wildland fire management: handbook for trainers**. Helsinki, 2007.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Grain drying theory I: Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agricultural Engineering Research** 6. v. 1, n. 1, p. 169–174, 1961.

HIGGINS, A.; WHITTEN, S.; SLIJEPCEVIC, A.; FOGARTY, L. G.; LAREDO, L. An optimisation modelling approach to seasonal resource allocation for planned burning. **International journal of wildland fire**, Washington DC, v. 20, p. 175–183, 2011.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ (IAPAR). **Estações meteorológicas**. Londrina: IAPAR, 2005. 145 p. Disponível em: <[http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias\\_Historicas/Ponta\\_Grossa.htm](http://www.iapar.br/arquivos/Image/monitoramento/Medias_Historicas/Ponta_Grossa.htm)>. Acesso em: 28 ago 2019.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ (IAP). **Plano de manejo do Parque Estadual de Vila Velha**. Curitiba, 2004. 145 p. Disponível em: < <http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1255.html>>. Acesso em: 28/08/2017.

JOLLIFFE, I. T.; STEPHENSON, D. B. **Forecast verification: a practitioner's guide in atmospheric science**. Chichester, 2012. 274 p.

KING, A. R.; LINTON, M. Moisture variation in forest fuels: the rate of response to climate changes. **Australian Journal of Applied Science**, v. 14, n. 1, p. 38 – 49, 1963.

KOVALSYKI, B. **Zoneamento de risco para o Parque Estadual de Vila Velha e seu entorno**. 76 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

KOVALSYKI, B.; TETTO, A. F.; BATISTA, A. C.; SOUSA, N. J.; TAKASHINA, I. K. Avaliação da eficiência da Fórmula De Monte Alegre para o município de Ponta Grossa – PR. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 10, n. 19, p. 208 - 218, 2014.

LARA, C. H. El concepto de inflamabilidad. In: VÉLEZ, R. (Ed.). **La defensa contra incendios forestales: fundamentos y experiencias**. Madrid: Mcgraw-Hill; 2009.

LOPES, S. M. G. **Modelos de previsão do teor de umidade de combustíveis florestais**. 150 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2013.

LOPES, S.; VIEGAS, D. X.; LEMOS, L. T.; VIEGAS, M; T. Equilibrium moisture content and timelag of dead *Pinus pinaster* needles. **International journal of wildland fire**, Washington DC, v. 23, n. 1, p. 721 - 731, 2014.

MAACK, R. **Geografia física do estado do Paraná**. 4º ed., Ponta Grossa, Editora da UEPG, 2012.

MACHADO, A. P. M.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V.; BIONDI, D.; BATISTA, A. P. B. Incêndios florestais no Parque Nacional da Chapada dos Guimarães-MT entre 2005 e 2014. **Nativa**, Sinop, v. 5, n. 5, p. 355 - 361, 2017.

MBANZE, A. A.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F.; ROMERO, A. M.; MUDEKWE, J. Desempenho dos índices de Nesterov e Fórmula de Monte Alegre no Distrito de Lichinga, Norte de Moçambique. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 27, n. 2, p. 687 – 696, 2017.

MELO, M. S. **Formas rochosas do Parque Estadual de Vila Velha**. Ponta Grossa, 2006. 145 p.

MELO, M. S.; MORO, R. S; GUIMARÃES, G. B; **Patrimônio natural dos Campos Gerais do Paraná**. Editora UEPG, Ponta Grossa – PR, 2007.

MILLER, J. D.; SAFFORD, H. D.; CRIMMINS, M.; THODE, A. E. Quantitative evidence for increasing forest fire severity in the Sierra Nevada and southern Cascade Mountains, California and Nevada, USA. **Ecosystems**, v. 12, n. 1, p. 16-32, 2009.

MORO, R. S. **Biogeografia do cerrado nos Campos Gerais**. Ponta Grossa: Ed. UEPG, 2012. 207p.

- MYERS, R. L. **Convivendo com o fogo**: manutenção dos ecossistemas e subsistência com o manejo integrado do fogo. TNC: USA, 2006. 28 p.
- NUNES, J. R. S. **FMA<sup>+</sup> - um novo índice de perigo de incêndios para o estado do Paraná – Brasil**. 169 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- NUNES, J. R. S.; FIER, I. S. N.; SOARES, R.V.; BATISTA, A. C. Desempenho da Fórmula de Monte Alegre (FMA) e da Fórmula de Monte Alegre Alterada (FMA<sup>+</sup>) no Distrito Florestal de Monte Alegre. **Floresta**, Curitiba, v. 40, n. 2, p. 319 - 326, 2010.
- PAGE, W. G.; JENKINS, M. J.; ALEXANDER, M. E. Models to predict the moisture content of lodgepole pine foliage during the red stage of mountain pine beetle attack. **Forest Science**, Oxford, v. 61, n. 1, p. 128 - 134, 2015.
- PIVELLO, V. R. The use of fire in the cerrado and amazonian rainforests of Brazil: past and present. **Fire Ecology**, Eugene, v. 7, n. 1, p. 24 - 39, 2011.
- POURGHASEMI, H. R. GIS-based forest fire susceptibility mapping in Iran: a comparison between evidential belief function and binary logistic regression models. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 31, n. 1, p. 80 - 98, 2016.
- PYNE, S. J. **Introduction to wildland fire**: fire management in the United States. Nova Iorque: Wiley-Interscience, 1984.
- RODERJAN, C. V.; GALVÃO, F.; KUNYIOSHI, Y. S.; HATSCHBACH, G. G. Unidades fitogeográficas do estado do Paraná, Brasil. **Ciência & Ambiente**. v. 1, n. 24, p. 75-92, 2002.
- RODRIGUES, A. **Caracterização do material combustível do estrato herbáceo em área do Parque Estadual de Vila Velha – Paraná como fator de influência na ocorrência de incêndios florestais**. 59 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2018.
- RODRÍGUEZ, M. P. R.; SOARES, R.V.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F.; SIERRA, C. A. M.; RODRÍGUEZ, Y. C. Ajuste e desempenho dos índices de perigo de incêndios Nesterov, FMA e FMA<sup>+</sup> na empresa florestal Macurije, Cuba. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 4, p. 651 - 660, 2012.
- RODRÍGUEZ, M. P. R.; SOARES, R.V.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F.; BECERRA, L. W. M. Comparação entre o Perfil dos Incêndios Florestais de Monte Alegre, Brasil, e de Pinar Del Río, Cuba. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 2, p. 231 - 240, 2013.
- SAMPAIO, O. B. **Análise de quatro índices na previsão de incêndios florestais**. 177 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.
- SAMPAIO, O. B.; SOARES, R. V. “Skill Score” – Um método para análise da eficiência de índices de incêndios florestais. **Floresta**, Curitiba, v.30, n.1-2, p. 172, 2000.
- SANTOS, J. F. L.; TETTO, A. F.; BERTACCHI, A.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V. Comparison of forest fire profiles in Londrina, Brazil and Pisa, Italy. **Floresta e Ambiente**, v.29, n. 6, p. 01 - 10, 2018.

SANTOS, J. F.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C. Perfil dos incêndios florestais em áreas protegidas no período de 1998 e 2002. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 1, p. 93 - 100, 2006.

SCHIKS, T. J.; WOTTON, B.M. Modifying the Canadian Fine Fuel Moisture Code for masticated surface fuels. **International journal of wildland fire**, Washington DC, v. 24, n. 1, p. 79 - 91, 2014.

SCHROEDER, M. J.; BUCK, C. C. **Fire weather**: a guide for application of meteorological information to forest fire control operations. Washington DC: US Forest Service, 1970.

SEGER, C. D. **Material combustível e comportamento do fogo em vegetação de estepe gramíneo-lenhosa na RPPN Caminho das Tropas, Palmeira, Paraná**. 197 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

SEGER, C. D.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V.; TETTO, A. F.; BIONDI, D. Caracterização do material combustível fino da estepe gramíneo-lenhosa no estado do Paraná, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 863 - 874, 2018.

SEGER, C. D.; TETTO, A. F.; BATISTA, A. C.; SOARES, R. V. Comportamento do fogo em queimas controladas de vegetação de estepe no município de Palmeira, Paraná, Brasil. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 13, p. 547 – 558, 2013.

SILVA, E. C. G. **Metodologia para quantificação de gastos públicos no combate a incêndios florestais em unidades de conservação**. 98 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

SILVA, P. A. H. Vila Velha e as origens dos Campos Gerais e das Florestas de araucária. **Coletânea de Pesquisas**, p. 23, 2011.

SIMARD, A. J. **The moisture content of forest fuels – I**: a review of the basic concepts. Canadian of Forest and Rural Development, 32p. Forest Fire Research Institute, Ontario: 1968a. (Information Report PS-X-58).

SIMARD, A. J. **The moisture content of forest fuels – III**: moisture content variations of fast responding fuels below the fibre saturation point. Canadian of Forest and Rural Development, 32p. Forest Fire Research Institute, Ontario: 1968b. (Information Report F-X-16).

SISTEMA METEOROLÓGICO DO PARANÁ – SIMEPAR. **Dados acadêmicos**. Disponível em: <[http://www.simepar.br/site\\_pw/faleconosco/dadosacademicos-create](http://www.simepar.br/site_pw/faleconosco/dadosacademicos-create)>. Acesso em: 18 mai 2019.

SLIJEPCEVIC, A.; ANDERSON, W. Hourly variation in fine fuel moisture in eucalypt forests in Tasmania. In: VIEGAS, D. X. (Ed.). **Proceedings of the Vth International Conference on Forest Fire Research**, Coimbra, Portugal, 2006.

SLIJEPCEVIC, A.; ANDERSON, W. R.; MATTHEWS, S.; ANDERSON, D. H. Evaluating models to predict daily fine fuel moisture content in eucalypt forest. **Forest Ecology and Management**, v. 335, n. 1, p. 261 - 269, 2015.

SOARES, R. V. Índice de perigo de incêndio. **Floresta**, Curitiba, v. 3, n. 3, 19-40, 1972.

- SOARES, R. V. **Prevenção e controle de incêndios florestais**. ABEAS, 1984.
- SOARES, R. V. **Incêndios florestais: controle e uso do fogo**. Curitiba: FUPEF, 1985.
- SOARES, R.V.; BATISTA, A.C.; TETTO, A.F. **Meteorologia e climatologia florestal**. Curitiba, 2015. 215 p.
- SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F. **Incêndios florestais: controle, efeitos e uso do fogo**. Curitiba, 2017.
- TETTO A. F., BATISTA A. C., SOARES R. V. Ocorrência de incêndios florestais no estado do Paraná, no período de 2005 a 2010. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 2, p. 391 – 398, 2012.
- TETTO, A. F. **Comportamento histórico dos incêndios florestais na Fazenda Monte Alegre no período de 1965 a 2009**. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.
- TETTO, A. F.; BATISTA A. C., SOARES R. V.; NUNES, J. R. Comportamento e ajuste da fórmula de Monte Alegre na Floresta Nacional de Irati, Estado do Paraná. **Scientia Forestalis**, v. 38, n. 87, p. 409-417, 2010.
- TETTO, A. F.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; WENDLING, W. T. Incêndios florestais atendidos pela Klabin do Paraná no período de 1965 a 2009. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 3, p. 345 – 351, 2015.
- TORRES, F. T. P.; LIMA, G. S.; MARTINS, S. V.; VALVERDE, S. R. Analysis of efficiency of fire danger indices in forest fire prediction. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 41, n. 2, p. 1 – 10, 2017.
- TORRES, F. T. P.; RIBEIRO, G. A.; MARTINS, S. V.; LIMA, G. S. Correlações entre os elementos meteorológicos e as ocorrências de incêndios florestais na área urbana de Juiz de Fora. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 1, p. 1 – 10, 2011.
- TOTH, Z.; TALAGRAND, O.; CANDILLE, G.; ZHU, Y. Probability and Ensemble Forecasts. In: JOLLIFFE, I. T.; STEPHENSON, D. B. (Ed.). **Forecast Verification**. Wiley, p. 137–163, 2003.
- TURNER, J. A. **A fire load index for British Columbia**. Canadian Forestry Service. British Columbia: 1972. 12 p. (Information Report BC-X-80).
- TYMSTRA, C.; BRYCE, R. W.; WOTTON, B. M.; TAYLOR, S. W.; ARMITAGE, O. B. **Development and structure of Prometheus: the Canadian Wildland fire Growth simulation mode**. Canadian Forestry Service. Ontario: 2010. 101p. (Information Report NOR-X-417).
- UNAL, I. defining an optimal cut-point value in ROC analysis: an alternative approach. **Computational and Mathematical Methods in Medicine**, v. 2017, n. 1, p. 1 – 14, 2017.
- VAN WAGNER, C.E. **Combined effect of sun and wind on surface temperature of litter**. Canadian Forestry Service. Ontario: 1969. 8p. (Information Report PS-X-10).

- VAN WAGNER, C.E. **Equilibrium moisture contents of some fine forest fuels in eastern Canada**. Canadian Forestry Service. Ontario: 1972. 12p. (Information Report PS-X-36).
- VAN WAGNER, C.E. **Structure of the Canadian forest fire weather index**. Canadian Forestry Service. Ontario: 1974. 32p. (Information Report PS-X-58).
- VAN WAGNER, C. E. **Method of Computing Fine Fuel Moisture Content Throughout the Diurnal Cycle**. Petawawa Forest Experiment Station., 1977. (Information Report PS-X-69).
- VAN WAGNER, C.E. **Development and structure of the Canadian fire weather index system**. Canadian Forestry Service. Ontario: 1987. 37p. (Forestry Technical Report 35).
- VÉLEZ, R. Instrumentos de planificación: índices de predicción del riesgo. In: VÉLEZ, R., (Ed.). **La defensa contra incendios forestales: fundamentos y experiencias**. Madrid: Mcgraw-Hill; 2009a.
- VÉLEZ, R. Factores ambientales: los índices meteorológicos de peligro. In: VÉLEZ, R., (Ed.). **La defensa contra incendios forestales: fundamentos y experiencias**. Madrid: Mcgraw-Hill; 2009b.
- VIEGAS, D. X.; BOVIO, G.; FERREIRA, A.; NOSENZO, A.; SOL, B. Comparative study of various methods of fire danger evaluation in Southern Europe. **International journal of wildland fire**, Washington DC, v. 9, n. 4, p. 235 - 246, 1999.
- VIEGAS, D. X.; REIS, R. M.; CRUZ, M. G.; VIEGAS, M. T. Calibração do Sistema Canadiao de Perigo de Incêndio para aplicação em Portugal. **Silva Lusitana**, Lisboa, v.12, n.1, p. 77– 93, 2004.
- WARD, J. H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American Statistical Association**. v. 58, n. 301, p. 236-244, 1963.
- WENDLING, W. T.; SOARES, R. V.; BATISTA, A. C.; TETTO, A. F. Danger degrees adjustment for the Monte Alegre Fórmula (FMA). **WIT Transactions on Ecology and The Environment**, Lavras, v. 158, n. 1, p. 199 – 209, 2012.
- WESTERLING, A. L. Increasing western US forest wildfire activity: sensitivity to changes in the timing of spring. **Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 371, n. 1696, p. 20150178, 2016.
- WHITE, B. L. A. Modelos matemáticos de previsão do teor de umidade dos materiais combustíveis florestais finos e mortos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 1, p. 432 - 445, 2018.
- WHITE, B. L. A.; RIBEIRO, G. T.; SOUZA, R. M. O uso do BehavePlus como ferramenta para modelagem do comportamento e efeito do fogo. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 73, p. 73-84, 2013.
- WHITE, B. L. A.; WHITE, L. A. S.; RIBEIRO, G. T.; FERNANDES, P. A. M. Development of a fire danger index for eucalypt plantations in the northern coast of Bahia, Brazil. **Floresta**, v. 43, n. 4, p. 601-610, 2013.

WHITE, L. A. S.; WHITE, B. L. A.; RIBEIRO, G. T. Evaluation of Forest Fire Danger Indexes for Eucalypt Plantations in Bahia, Brazil. **International Journal of Forestry Research**, v. 2015, n. 1, p. 1 – 6, 2015.

WILKS, D. S. **Statistical methods in the atmospheric science**: 3rd ed. Oxford, 676 p, 2011.

WOTTON, B. M. A grass moisture model for the Canadian Forest Fire Danger Rating System. EIGHTH SYMPOSIUM ON FIRE AND FOREST METEOROLOGY. **Anais do Eighth Symposium on Fire and Forest Meteorology**, Boston: American Meteorological Society, 2009.